

Technical University of Denmark



Pålidelighedsmodel for havvindmølleparker

Christensen, Palle; Paulsen, J.L.; Thøgersen, M.L.; Krogh, T.; Raben, N.; Donovan, M.H.; Jørgensen, L.; Winther-Jensen, M.

Publication date:
2002

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Christensen, P., Paulsen, J. L., Thøgersen, M. L., Krogh, T., Raben, N., Donovan, M. H., ... Winther-Jensen, M. (2002). Pålidelighedsmodel for havvindmølleparker. (Denmark. Forskningscenter Risø. Risø-R; Nr. 1346(DA)).

DTU Library

Technical Information Center of Denmark

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Pålidelighedsmodel for havvindmølleparker

**Palle Christensen, Jette Lundtang Paulsen, Morten Lybech
Thøgersen, Thomas Krogh, Forskningscenter Risø**

**Niels Raben, Martin Heyman Donovan og Lars Jørgensen,
SEAS**

Martin Winther-Jensen

Pålidelighedsmodel for havvindmølleparker

**Palle Christensen, Jette Lundtang Paulsen, Morten
Lybech Thøgersen, Thomas Krogh, Forskningscenter Risø**

**Niels Raben, Martin Heyman Donovan og Lars Jørgensen,
SEAS**

Martin Winther-Jensen

Resume I dette projekt er der udviklet en metode til forudsigelse af en havmøllepark tilgængelighed som funktion af en lang række faktorer, især den enkelte mølles pålidelighed, strategien for forebyggende vedligehold, vejret, antallet af reparationshold, typen af skibe til rådighed. Tilgængeligheden er summen af de brøkdele af tiden, hvor de enkelte møller kan producere. Rødsand er valgt som et gennemgående eksempel, da projektet er udført sammen med SEAS Vindteknik. Der er opbygget en vejrmødel baseret på målinger af klimaet på Rødsand. Forudsigelsen foretages med Monte Carlo-simulation. Der er udviklet software til forbehandling af vejrdato og til Monte Carlo-simuleringen. Der er gennemregnet tre eksempler, det ene med arbitrært valgte parametre, de to øvrige med parametre valgt så tæt på forholdene på Rødsand som muligt. Projektet er støttet af Energiministeriets UVE-midler

ISBN 87-550-3066-1
ISBN 87-550-3068-8 (Internet)
ISSN 0106-2840

Print: Pitney Bowes Management Services Denmark A/S, 2002

Indhold

1	Indledning	5
2	Præcisering af opgaven	6
3	Vedligehold	7
3.1	Terminologi for vedligehold	7
3.2	Metoder for vedligehold	7
4	Klimaets indflydelse på vedligeholdet	9
4.1	Begrænsninger på udførelse af arbejde på møllerne	9
4.2	Klimadata	10
5	Metode for modellering med Rødsand som eksempel	10
5.1	Klimatiske målinger på Rødsand	11
5.2	Modellering af adgangsforholdene til mølleparken med Markov-kæder	13
5.3	Monte Carlo-simulering som modellering af adgangsforholdene	17
5.3.1	Modellering af enkelthændelser	17
5.3.2	Modellering af rådighedsfaktoren for en møllepark	18
5.4	Tre eksempler	18
5.4.1	Eksempel 1 og dets resultater	19
5.4.2	Eksempel 2 og dets resultater	21
5.4.3	Eksempel 3	23
5.5	Følsomhedsanalyse for nogle vigtige parametre i Monte Carlo-simuleringen for mølleparkens rådighedsfaktor	24
6	PC-programmer for modellerne	25
7	Verifikation af klimamodellen	25
7.1	Verifikation ved hjælp af re-samplede data	25
7.2	Verifikation ved sammenligning med Dansk Hydraulisk Instituts ”vejrvinduer”	27
	Referencer	29
	Appendix	31
	A Projektbeskrivelse fra ansøgning	
	B Afklarende spørgsmål og foreløbige svar	
	C Fejltræsmodel. Regneark for en enkelt mølles tilgængelighed	
	D Sandsynlighedsfordeling for mølleudfald	
	E Bayesisk netværk som beslutningsværktøj og klimamodel	
	F Fejldata for 163 møller fra SEAS og deraf afledede statistiske modeller	
	G Model for vejrvindue fra Dansk Hydraulisk Institut (DHI)	

Forord

Dette UVE-projekt, "Pålidelighed af havvindmøller" er det nyeste i rækken af projekter om udredning af pålidelighedsproblemer for store vindmøller, som er udført med støtte fra Energistyrelsens programmer som et samarbejde mellem Risø og industrien siden 1988 [1-4]. Nærværende projekt er blevet udført i nært samarbejde mellem SEAS vindteknik og afdelingerne for systemanalyse og for vindenergi på Risø og i kontakt med et anden gruppe, som har udarbejdet "designgrundlag for vindmølleparker på havet". Tidligere projekter har beskæftiget sig med møller på land, hvor reparationstiden ved møllestop har været forudsigelig i form af statistikker baseret på erfaringer. Til havs er dette langt vanskeligere, da vejrforholdene kan lægge hindringer i vejen for reparationsarbejder ved møllestop. Ved projektets start var der ingen anvendelige kvantitative modeller til rådighed, så projektet har i høj grad beskæftiget sig med metodevalg og definition af begreber. Der var på dette tidspunkt heller ingen havmølleparker, så de indledende overvejelser om modellering refererede i høj grad til oplysninger om de planlagte havmøller på Middelgrunden og i mindre grad til de fjernere planlagte mølleparker i Østersøen og i Vesterhavet. Projektets endemål har været en forudsigelse af en mølleparks samlede, gennemsnitlige produktionssevne, baseret på forudsigelser af tiden mellem fejl for en enkelt mølle, tiden, der skal anvendes til forebyggende vedligeholdelse, og de meget vejrafhængige transporttider ved reparationer ved møllestop.

Som nævnt var metodevalget ingen selvfølge, så historisk set har projektet bevæget sig i en kurvet bane med overvejelser og forsøg med brug af fejltræer og Bayesiske netværk (appendiks E); samtidig hermed er der sket en afklaring om mulige vedligeholdsformer til havs, hvor klimaet spiller en stor rolle, og en specifikation af de parametre, der er nødvendige til beskrivelse heraf. Der er også udviklet en enkel metode, som ved hjælp af et regneark og baseret på fejltræsmetodik, der kan forudsige en enkelt mølles tilgængelighed på basis af fejltræer for møllens hovedkomponenter (appendiks C).

De fleste tabeller og figurer anvender engelske tekster, da de anvendes i andre forbindelser, f.eks. i Users' Guides til den udviklede software. Vi har derfor valgt at bibeholde dem i deres oprindelige form.

1 Indledning

Ved tidligere projekter, som Risø har deltaget i om pålidelighed af vindmøller, har pålidelighedsanalysen kunnet gennemføres med traditionelle metoder, dvs. ved hjælp af fejlmåde- effektanalyse, hændelsestræer og fejltræsanalyse. Dette skyldes at det var analyser af allerede eksisterende enkeltmøller med kendte komponenter. For havmølleparker er designfasen stadig mere åben, idet der kan træffes beslutning om mange faktorer såsom valg af mølleparkens placering, mølletype, vedligeholdsstrategi og størrelse og type af hjælpeskib. Med de traditionelle metoder kunne opgaven løses ved iteration gennem modellering og gennemregning af hver af de mange kombinationsmuligheder, f.eks. ved hjælp af fejltræer, hvilket dog ville betyde en meget stor arbejdsindsats. I fejltræsanalyse er mulighederne for at modellere vedligeholdsstrategien i detaljer ikke særligt veludviklet; den kan udtrykkes som en gennemsnitlig reparationstid eller tid mellem inspektioner. For en havmøllepark spiller sejladsen til møllerne imidlertid en så stor rolle, at det er nødvendigt med en mere detaljeret modellering.

Problemet forekom velegnet til beslutningsanalytisk modellering, såsom Influenzadiagrammer baseret på Bayesiske netværk [5] og/eller Monte Carlo simulation (som det senere skulle vise sig) [6].

Efter aftale fra Energistyrelsens bedømmelsesudvalg for ansøgninger om denne type projekter blev et aftalt, at projektet skulle foretage en evaluering af pålidelighedsfaktorer, der ville muliggøre en præcisering af de enkelte faktorer, der påvirker en havmølles pålidelighed eller tilgængelighed.

Der lægges særlig vægt på, at møllerne under det forebyggende vedligehold kun er stoppet under arbejdets udførelse. Ved afhjælpning af tilfældigt indtrufne fejl må det korrektive vedligehold afvente godt vejr, medens møllen står stille. Sidstnævnte forhold gør vedligehold til havs meget forskelligt fra vedligehold til lands, hvor adgangen til møllerne ikke afhænger af vejret.

Rapporten vil beskrive vedligeholdsproblemer generelt, vejrforholdenes indflydelse på vedligehold til havs og en Monte Carlo model til forudsigelse af en havmølleparks tilgængelighed.

Den udviklede vejrmodel forenkler klimaets kontinuerte fordeling af mange parametre til en diskret model med f.eks. 6 intervaller mellem 0 og 1 af sandsynlighed for at kunne sejle ud til mølleparken. Vedligeholdsmodellen kan forudsige rådighedsfaktoren (middel availability) ved at gennemspille et stort antal scenarier med den gældende vejrmodel og vedligeholdsstrategien beskrevet ved dens relevante parametre.

2 Præcisering af opgaven

Ansøgningen, som lå til grund for UVE-bevillingen til nærværende projekt, beskrev dels formålet med opgaven, nemlig at udvikle en pålidelighedsmodel for en møllepark til havs, og dels nogle forslag til valg af metoder til opgavens løsning. Ansøgningens projektbeskrivelse er vist i appendiks A.

Projektdeltagernes forhåndsviden var specialiseret således at ingen deltager kunne overskue hele emnet. I øvrigt var der ingen større mølleparker til havs på dette tidspunkt, som man kunne drage erfaringer fra. Dog forelå der design-erfaringer fra Middelgrunden og materiale fra de indledende overvejelser om mølleparken på Rødsand. Derfor besluttedes det at foretage en systematisk indsamling af viden om emnet hos deltagerne og deres institutioner. Dette blev udført ved hjælp af et spørgeskema udarbejdet i fællesskab. Skemaet og besvarelserne er vist i appendiks B. Den ønskede viden er beskrevet struktureret i følgende 6 afsnit:

- Møllen selv
- Elsystemet
- Fjernovervågning og fjernkontrol af møllerne
- Kommunikation mellem mølle og kontrolstation på land
- Vedligeholdsstrategi
- Møllernes geografiske placering

Driftsbetingelserne til havs er forskellige fra driftsbetingelserne for landbaserede møller. Havmiljøet må forventes at give en vis forøgelse af ældningshastigheden for hele møllekonstruktionen. Dette er der taget hensyn til i designet, så en levetid på 20 år stadig kan opretholdes ligesom for landbaserede møller.

Det var klart fra undersøgelsen, at der var tale om 50-100 store møller med et udubleret, 132 kV enkeltstrenget system som transportmedium for den producerede elektricitet. Det blev også klart, at reparations- og vedligeholdsarbejde ville blive omfattende, og at det ville være stærkt påvirket af klimaet og de til rådighed værende transportfartøjer. Det blev besluttet at arbejde på en forudsigelse af mølleparkens samlede tilgængelighed (availability) som mål for pålideligheden. Ydermere var det klart, at elsystemets tilgængelighed kunne holdes udenfor overvejelserne, idet nedbrud for kabler kunne behandles selvstændigt og uafhængigt af møllerne.

Opgaven var dermed formuleret som en forudsigelse af mølleparkens tilgængelighed (availability) som funktion af klimaet og vedligeholdstrategien.

3 Vedligehold

3.1 Terminologi for vedligehold

Ved modelleringen vil blive anvendt en række specielle udtryk, som kræver en nøjagtig definition. Disse udtryk er angivet i det følgende.

Modellerne vil kunne anvendes til forudsigelse af *middelrådighedsfaktoren* af en møllepark på havet som funktion af *møllekomponenternes* pålideligheder og den heraf afledede *middeltilgængelighed* for en enkelt mølle, varighed af møllestop pga. præventivt og korrektivt *vedligehold* af møllerne samt af *vejret* og dets forventede *udvikling*.

Til rådighed betyder her, at en møllepark kan producere el, hvis der er vind og fravær af udefra kommende forhindringer.

Middelrådighedsfaktoren defineres som den brøkdel af den installerede effekt, der i middel er til rådighed på årsbasis. Ofte vil denne størrelse dog blot blive kaldt Rådighedsfaktoren.

Tilgængelighed defineres her som rådighedsfaktoren for en enkelt mølle (availability).

Præventivt vedligehold er tidsbaseret, planlagt vedligehold.

Korrektivt vedligehold er afhjælpning af fejl indtrådt uventet og på trods af det præventive vedligehold.

3.2 Metoder for vedligehold

Den historiske udvikling for vedligehold har groft taget tre epoker. Den første er tiden før 1940, hvor man reparerede tingene, når de gik i stykker. Den næste er tiden under anden verdenskrig og lige efter. Mangel på produktionsudstyr åbnede øjnene for nytten af forebyggende vedligehold. Den tredje epoke, tiden siden 1970, hvor kravene til profit af produktionsudstyr er steget voldsomt, har set fremkomsten af vedligeholdsmetoder, som er baserede på tankegangen bag pålidelighedsteknik.

I litteraturen er optimering af vedligehold oftest beskrevet som en optimering af økonomien, idet der tages hensyn til udetid, udgifter til reparationsmandskab og varelager af reservedele. For offentlige forsyningsanlæg er det nødvendigt at tage forsyningssikkerheden i betragtning ved planlægning af vedligeholdet; dette kan udtrykkes som en økonomisk faktor. Til sikkerhedsrelaterede systemer derimod kan der stilles endnu højere krav, og som dokumentation vil der kunne kræves en risikoanalyse

Det kan være nyttigt at klassificere de forskellige former som vedligehold. Beskrivelsen må baseres på statistiske metoder da fordelingen af fejl og reparationstider er statistiske fænomener. De fleste kvantitative beskrivelser kan føres tilbage til "Renewal Theory" som beskrevet af D.R.Cox i bogen af samme navn [7]. Alle fem former for vedligehold er nævnt for fuldstændighedens skyld. I

nærværende projekt vil ifølge de nuværende planer kun de tre første former komme i anvendelse. Som tidligere nævnt er den fejlede mølle stoppet under hele forløbet af korrektivt vedligehold, medens møllen under præventivt vedligehold kun er stoppet under selve arbejdet på møllen.

Hvis målet med modelleringen er en forudsigelse af udbyttet af fremgangsmåderne 1-5, er der behov for kendskab til omkostninger, dels for mandskab og dels for reservedele og for udetider for møllerne.

For hver type er anført de relevante, kvantiserbare parametre:

1. Korrektiv vedligehold. Denne metode afventer fejlenes indtræden som igangsætter af en reparation.

Fejlhyppigheder
Tid for fremskaffelse af reservedele
Ventetid for ankomst af reparationsmandskab
Transporttid til møllen
Reparationstid for møllen

2. Forebyggende vedligehold. Metoden sigter mod at forebygge fejl ved periodiske eftersyn med udskiftning af komponenter, som er udsat for slid eller ældning. Vedligeholdet vil især tage sig af komponenter, der har en klar, primær betydning for systemets funktion. For komponenter af sekundær betydning for funktionen kan man vælge mellem periodisk udskiftning med andre tidsintervaller eller blot vedligeholde dem korrektivt. Basismaterialet for planlægningen er historiske oplysninger om komponentfejl og sikkerhedssystemer.

Fejlhyppigheder
Levetider
Reservedele på lager
Mandskabets indsats planlagt
Transport til møllen planlagt
Reparationstid for møllen

3. Tilstandsbaseret vedligehold er baseret på overvågning af komponenter og reparation eller udskiftning baseret på den øjeblikkelige værdi af de overvågede parametre. Herved muliggøres en udskiftning, der tilpasses den individuelle, aktive komponents grad af udslidning. Metoden giver også fleksibilitet i valg af tidspunktet for vedligeholdsarbejdet.

Tid til vurdering af tilstanden
Tid til fremskaffelse af komponenter
Måske ventetid for ankomst af reparationsmandskab
Transporttid til møllen
Tid for ændring i møllen

4. Proaktivt vedligehold kombinerer forebyggende og tilstandsbaseret vedligehold og indfører fremgangsmåder til eliminering af systematiske fejl. Ved hjælp af analyser, der bestemmer den tilgrundliggende fejl, når man frem til ændringer af f.eks. design eller justering, der afhjælper den systematiske fejl.

Tid til vurdering af historisk materiale
Tid til redesign
Tid til fremskaffelse af eventuelle eksemplarer af nye komponenttyper
Måske ventetid for ankomst af reparationsmandskab
Transporttid til møllen
Tid for ændring i møllen

5. Pålidelighedsbaseret vedligehold (RCM) sigter mod en anvendelse af alle vedligeholdsmuligheder så pålideligheden af kritiske komponenter bliver så høj som muligt. Metoden forudskikker eksistensen af en pålidelighedsmodel, ofte en FMECA-analyse til lokalisering af de mest kritiske komponenter, samt kendskab til fejlrater for komponenterne. Vedligeholdet planlægges så de kritiske situationer undgås i videst muligt omfang under hensyntagen til økonomien.

Fejlhyppigheder
Levetider
Tid til jævnlig vurdering af fejlhyppigheder op mod pålidelighedsmodellen
Tid til revision af aktuelt pålidelighedsprogram
Reservedele på lager
Mandskabets indsats planlagt
Transport til møllen planlagt
Reparationstid for møllen

Desuden er der TPM (Total Productive Maintenance), den japanske vedligeholdelsesmodel, hvor hele personalet på anlægget deltager i vedligeholdelsesarbejdet.

4 Klimaets indflydelse på vedligeholdet

4.1 Begrænsninger på udførelse af arbejde på møllerne

Der foreligger et sæt regler for sikkerheden ved sejlads og helikopterflyvning til og fra samt arbejde på havmøller under forskellige vejrforhold. I tabel 1 er angivet de begrænsende klimatiske faktorer for sejlads med 3 størrelser af skibe og flyvning med helikopter. Reglerne fastslår, at en overskridelse af blot en af maksimalværdierne skal forhindre sejlads eller flyvning til mølleparken.

Det fremgår af tabel 1, at der er 10 forskellige klimaparametre, der enkeltvis kan forhindre transport til mølleparken, når deres definerede maksimalværdier overskrides. Derfor kunne en traditionel modellering af klimaet bestå i en separat fysisk modellering af de enkelte parametre, såsom vind, strøm, bølger og is, indflydelse på adgangsforholdene til mølleparken. For de fleste anvendelser ville man traditionelt anvende en Gauss-proces for korttidsvariationerne i vind med turbulens og bølgehøjde. Desværre foreligger der ingen stokastiske modeller for disse fænomeners langtidsvariation. I nogle tilfælde kan den forenede fordeling af klimatiske parametre modelleres, f.eks. *Sørensen og Sterndorff* [8]

og *Bitner-Gregersen og Hagen* [9]. Det er imidlertid meget vanskeligt at opnå et skøn på auto- og krydskorrelationerne for processerne.

Vejrets udvikling kan beskrives som en statistisk fordeling af tid fra en konstateret overskridelse af grænserne for de ovenfor nævnte vejrindikatorers tilladte værdier til de igen er faldet til et niveau, der muliggør sejlads og/eller arbejde i en passende periode. Foreliggende vejrstatistikker kan ikke i denne forbindelse blot håndteres som rene, tidsuafhængige fordelingsfunktioner for de forskellige klimaparametre. Vejret er som bekendt et fænomen, der forandrer sig kontinuerligt med tiden. En ren fordelingsfunktion ville kunne foreslå vintervejr en dag og sommervejr den næste.

Vedligeholdsssekvenser har forskellig varighed, så en simulering må gå ud fra en tilfældigt valgt vejr-situation, og derefter benytte klimamodellen til bestemmelse af vejret i hele den periode, sekvensen varer. Hvis f.eks. sekvensen varer 15 timer, altså mere end modellens grundenhed 8 timer, dvs. at klimamodellen antager et vejrskifte hver ottende time, kan vejret ikke forudsiges som en uforanderlig enhed i de 15 timer, hvorfor modellen må tages i brug ved forudsigelse af de følgende dele af den totale sekvens.

Metoden er udviklet i nær forbindelse med et eksempel fra Rødsand havmøllepark.

4.2 Klimadata

Der er store forskelle på det lokale havklima på de forskellige pladser, der er udset til at have havmølleparker. De nødvendige oplysninger erhverves lettest i de ønskede formater ved målinger på stedet over en passende lang periode. Da mølleparkens levetid antages at være 20 år, kunne nogle års måletid være ønskeligt, men i praksis må man ofte nøjes med et par år.

Som nævnt ovenfor vil en overskridelse af en enkelt af grænseværdierne kunne forhindre udførelsen af et vedligeholdsarbejde. Derfor skal en model, som kan anvendes her, dels gøre rede for fordelingen af varighederne af de perioder, hvor ingen grænseværdier overskrides, og dels, hvordan vejret udvikler sig i de tidsrum, et stykke arbejde kan vare. For sidstnævnte må en passende diskretisering af intervallerne foretages.

5 Metode for modellering med Rødsand som eksempel

Udviklingen af metoderne er foregået i nær tilknytning til et eksempel, som projektgruppen har haft adgang til, nemlig den planlagte møllepark på Rødsand. Denne fremgangsmåde har sikret, at metoderne kom til at passe så godt som muligt til opgaven. Metoderne er dog efterfølgende gjort så generelle, at der kan anvendes en stor variabilitet i simuleringerne. Beskrivelsen af metoderne er i analogi med arbejdets udførelse foretaget med materialet fra Rødsand som et inkluderet, eksempel. Dermed har det også været hensigten at lette forståelsen af den valgte metodik.

5.1 Klimatiske målinger på Rødsand

Vindmølleparken på Rødsand får en mærkeeffekt på 150 MW. Med dagens typer af vindmøller svarer det til ca. 70 møller på hver 2 MW. Det er planen at igangsætte byggeriet af mølleparken i oktober 2002.

En meteorologimast blev etableret på stedet i oktober 1996 for at fremskaffe et mere præcist billede af klimaet på stedet end det eksisterende. Der blev målt løbende og hver halve time blev måleværdien på dette tidspunkt registreret sammen med maksimumsværdien indenfor den sidste halve time og standardafvigelsen for måleværdien i samme periode. På grund af tekniske problemer med måleudstyret findes en sammenhængende måleserie ikke. Der findes måleværdier for perioden 20. Marts 1998 til 30. Januar 2000. I denne periode er der registreringer i en tid svarende til ca. 183 døgn. Det er klart, at denne måleserie ikke kan repræsentere langtidsvariationer i klimaet fra år til år. Imidlertid er disse de bedste data, som findes i øjeblikket, og de blev anvendt til projektets forudsigelser med dette forbehold. Der blev målt vindhastigheder i højderne 10, 30, 43 og 50 meters højde over havets overflade. Vindretningen blev målt i højderne 30 og 43 meter. Bølgehøjde og havstrømmenes fart og retning blev også registreret.

Data fra Rødsand er analyseret i to interne rapporter [12] og [13].

Tabel 1. Havklimatiske maksimumsværdier for arbejde på havvindmøller.

Climatic parameter (main parameter)	Sub-parameter	Unit	Small size ship: Length: 4-6 m Dead Weight: 0.4 t Bollard force: 1 kN Impact energy: 0.5 kNm	Medium size ship: Length: 12 m Dead Weight: 10 t Bollard force: 10 kN Impact energy: 1.5 kNm	Large size ship: Length: 20 m Dead Weight: 50 t Bollard force: 30 kN Impact energy: 4 kNm	Helicopter
Wind speed	Speed	m/sec	20	20	20	17
Airtemperature ¹⁾	Maximum	°C	N/A	N/A	N/A	N/A
	Minimum	°C	-15	-15	-15	-5
Visibility ²⁾	Minimum	m	1000	100	200	800
Lightning	Density	no./ (km ² ·hour)	>0	>0	>0	>0
Precipitation	Rain	mm/hour	10	10	10	5
	Snow	mm/hour	50	50	50	20
Waves	Height, H_s	m	0.5	1	1.5	N/A
	Crossing period, T_z	sec	2.5	3.0	3.7	N/A
Sea-currents	Speed	m/s	N/A	N/A	N/A	N/A
Water level	Maximum	m	N/A	N/A	N/A	N/A
	Minimum	m	0.5	1.5	2.5	N/A
Sea-ice	Thickness, solid	m	0	0.1	0.2	N/A
	Scattered icecover	%	10	50	60	N/A
Ice cover	Atmospheric	mm/hour	>0	>0	>0	>0
	Sea-splashes	mm	>0	>0	>0	N/A
¹⁾ The wind-chill-factor is included in this temperature.						
²⁾ The limits are dependent on the actual type of positioning and reconnaissance equipment used.						

5.2 Modellering af adgangsforholdene til mølleparken med Markov-kæder.

For at finde en løsning på problemet med at etablere en generel stokastisk model til beskrivelse af de enkelte klimaparametre og deres interaktion fokuseredes på en anden stokastisk proces, $A(t)$, som modellerer adgangen til mølleparken i en specificeret periode, f.eks. en 8-timers periode. Ideen er at klassificere eller filtrere hver halvtimes-måling ved sammenligning med grænseværdierne fra tabel 1 i ”god” og ”ikke god”. Hvis det er muligt at komme ud til mølleparken antager variabelen AH værdien 1, hvis ikke værdien 0.

$$AH(t_i) = 0 \text{ for } (c_1(t_i) > c_{1,\text{bound}}) \vee (c_2(t_i) > c_{2,\text{bound}}) \vee \dots (c_n(t_i) > c_{n,\text{bound}})$$

$$AH(t_i) = 1 \text{ for alle andre tilfælde}$$

hvor AH er adgangsmuligheden for den pågældende halvtimes registreringsperiode (tilgængelig eller ikke tilgængelig),
 c_n er den klimatiske parameter,
 $c_{n,\text{bound}}$ er grænseværdien for den klimatiske parameter (tabel 1),
 n er antallet af havklimatiske parametre inkluderet i analysen og
 i er indexnummeret for den pågældende halvtimes-registrering.

Til eksempel er i fig. 1 vist tilstanden af AH for 2 udvalgte dage i året 2000, medens figur 2 viser alle de registrerede parametre for de samme 2 dage.

Skibstype	Adgang
Stort skib	27/01: +++++ 28/01: +++++
Mellem-Stort skib	27/01: ----- 28/01: +++++
Lille skib	27/01: ----- 28/01: -----

Figur 1: Adgangsvariabel for 2 udvalgte dage for Rødsand baseret på halvtimes-registreringer. ”+” betyder adgang, ”-” betyder ingen adgang.

Når adgangstilstanden er bestemt for hver halve time vælges et længerevarende tidsinterval, f.eks. 8 timer. Derpå bestemmes $A(t)$, som beskriver den brøkdel af tiden, mølleparken kan nås, i det valgte interval (de 8 timer):

$$A(t) = \frac{\sum_{i=1}^N AH(t_i)}{N}$$

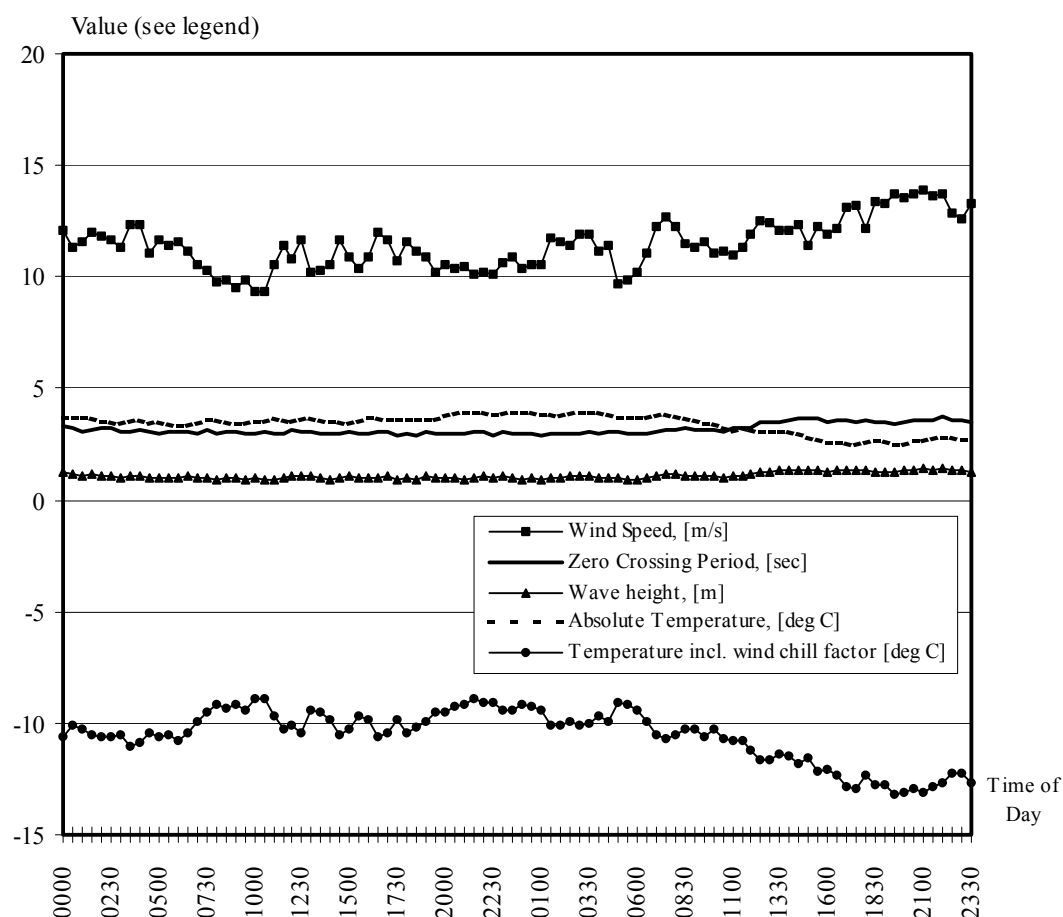
Dette større interval er valgt for at beskrive variationerne i vindklimaet i denne periode fremfor i de indgående halve timer. Dette muliggør en tilnærmet beskrivelse af klimaet med en Markov-model. Længden af intervallet kunne vælges så den passede til de fysiske forhold, f.eks. perioder med lavtrykspassager,

og bringes i overensstemmelse med de foreliggende data inklusiv sæsonvariationer. Analyser af denne art er påtænkt som et kommende forskningsprojekt og er ikke blevet udført i nærværende projekt.

Processen $A(t)$ kan nu modelleres som en "state and index discrete" Markov-proces, dvs. en proces, hvor sandsynligheden for at processen antager værdien a_{n+1} til tiden t_{n+1} kun afhænger af den nærmest foregående observerede værdi $A(t_n) = a_n$ til tiden nu, nemlig t_n . Se f.eks. Nielsen [6]. En "state and index discrete" Markov-kæde $\{ A(t), t \in (t_1, t_2, \dots, t_n, \dots) \}$, hvor index-parameteren t , som repræsenterer tiden i ækvivalente intervaller, beskrives ved følgende relation mellem sandsynlighedsfunktioner:

$$P(A(t_{n+1}) = a_{n+1} | A(t_n) = a_n \wedge \dots \wedge A(t_2) = a_2 \wedge A(t_1) = a_1) = P(A(t_{n+1}) = a_{n+1} | A(t_n) = a_n), t_n > t_{n-1} > \dots > t_2 > t_1$$

Markov-kædens diskrete tilstande betegnes a_1, a_2, \dots, a_n . En stationær Markov-proces er fuldstændigt beskrevet ved sine første ordens sandsynligheder, som er sandsynlighederne for de enkelte tilstande ved begyndelsestidspunktet t_1 : $P(A(t_1) = a_i), i = 1, 2, \dots$, og dens overgangssandsynlighedsmatrice, som rummer sandsynlighederne for hver enkelt af de nye tilstande forudsat den nuværende tilstand er kendt. Fastlæggelsen af disse to matricer indgår derfor i nærværende projekts modellering af klimaet. I denne modellering antages det, at 6 eller 4 tilstande er tilstrækkeligt. I tabel 2 er første ordens sandsynlighederne vist for Rødsand for 8-timers perioder og de eksisterende måledata. Det ses af tabel 2, at der er en stor forskel i adgangsmulighederne med de tre størrelser af skibe som defineret i tabel 1. Det lille skib virker nærmest som uanvendeligt, medens de to andre er væsentlig bedre med en tilladt adgang til mølleparken på 80% og 95 % af tiden.



Figur 2. Målte havklimatiske parametre på Rødsand 27 og 28 januar 2000.

Overgangssandsynlighedsmatricen har følgende formulering:

$$P_{ij}^{(n)} = P\left[A(t_{n+1}) = a_i \mid A(t_n) = a_j\right] \quad P_{ij}^{(n)} = P\left[A(t_{n+1}) = a_i \mid A(t_n) = a_j\right]$$

For en stationær Markov-kæde ændrer overgangssandsynlighedsmatricen sig ikke med værdien af indekset n . Her er processen modelleret som stationær med mulighed for senere at inkludere sæsonvariationer. Overgangssandsynlighedsmatricen for det mellemstore skib ser således ud:

$$P = \begin{bmatrix} 0.516 & 0.161 & 0.194 & 0.097 & 0.032 & 0.000 \\ 0.400 & 0.150 & 0.050 & 0.050 & 0.100 & 0.250 \\ 0.143 & 0.143 & 0.238 & 0.000 & 0.143 & 0.333 \\ 0.100 & 0.150 & 0.100 & 0.150 & 0.150 & 0.350 \\ 0.087 & 0.043 & 0.043 & 0.087 & 0.174 & 0.565 \\ 0.002 & 0.009 & 0.014 & 0.026 & 0.021 & 0.928 \end{bmatrix}$$

Den kontinuerte fordeling af vejrvinduet erstattes således af en diskret fordeling med 6 intervaller for sandsynlighederne for at kunne komme ud til mølleparken.

De omtalte seks tilstande svarer altså henholdsvis til en sandsynlighed 0 for at komme ud til mølleparken, sandsynligheden 0,00-0,25 for at nå derud osv., ind-

til tilstand nr. 6, der svarer til en sandsynlighed på 1,00 for at kunne komme derud. Det er disse seks intervaller, som vejret kan skifte imellem, der betragtes som mulige tilstande (states) i Markov-analysen.

Sandsynlighederne for overgang mellem tilstandene a_3 til a_6 er bestemt ud fra et meget lille sæt af tilfælde. Da disse tilstande dog forekommer ret sjældent, kunne det indikere et valg af færre tilstanden end 6. I eksemplet i 5.4.1er der anvendt 6 tilstande, medens eksemplerne i 5.4.2 og 5.4.3 kun anvender 4 tilstande.

Tabel 2. Førsteordens sandsynligheder for adgang til Rødsand mølleparken med skibe af forskellig størrelse.

State	Range [A(t)]	Small Ship P[a _i]	Medium Ship P[a _i]	Large Ship P[a _i]
a ₁	0.000	0.34555	0.05759	0.00873
a ₂	0.000-0.250	0.07155	0.03490	0.00698
a ₃	0.250-0.500	0.07504	0.03665	0.01222
a ₄	0.500-0.750	0.09250	0.03490	0.00524
a ₅	0.750-1.000	0.07330	0.04014	0.02618
a ₆	1.000	0.34206	0.79581	0.94066

Tabel 3. Varigheden af en arbejdsoperation på 10, 20 eller 100 timer baseret på 100.000 simuleringer.

Required worktime [hours]	Small ship		Medium ship		Large ship	
	Mean [hours]	Std.dev. [hours]	Mean [hours]	Std.dev. [hours]	Mean [hours]	Std.dev. [hour]
10	77.2	65.9	33.0	18.1	26.8	4.2
20	135.0	86.3	63.8	23.9	53.8	6.6
50	314.0	124.5	168.5	33.7	148.9	8.3
100	614.6	172.6	338.8	48.3	299.4	13.6

For at sammenkæde klimamodellen med en anden model, som her beskriver reparation og vedligehold implementeredes klimamodellen indenfor et Monte Carlo-program. Når reparation- og vedligeholdelsesarbejder skal simuleres under hensyntagen til klimaet anvendes data for disse arbejder som input til Monte Carlo-simuleringen. Vigtige tal er antallet af reparatører og den forventede arbejdstid på en opgave i godt vejr uden forsinkelser herfra. Det antages generelt, at en arbejdsdag er på 8 timer efterfulgt af en 16 timers hvileperiode. Det betyder naturligvis, at hver tredje realisation af adgangen skal udelades.

Tabel 3 viser resultatet af Monte Carlo-analysen; For de tre skibsstørrelser er vist, hvor meget kalendertid, der medgår til at udføre arbejdsopgaver af størrelserne 10, 20, 50 og 100 arbejdstimer. Det ses også, at der er stor usikkerhed på varigheden af en enkelt arbejdsopgave jo mindre det anvendte skib er. Variationskoefficienten (COV) er så høj som 28-78% for det lille skib. For det mel-

lemstore skib er usikkerheden også ganske høj, især for arbejder af kort varighed.

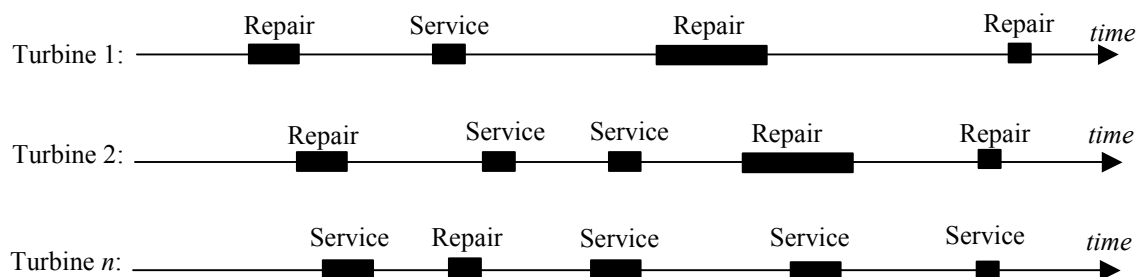
5.3 Monte Carlo-simulering som modellering af adgangsforholdene

Som model for adgangen til mølleparken bruges den omtalte Monte Carlo-simulering. Modellen simulerer adgangen til turbinerne i hele deres levetid og udetiden for de enkelte møller i parken.

Kort beskrevet udfører Monte Carlo-analysen følgende operationer:

- 1) Simulering af de klimatiske forhold på stedet for hver dag i møllens levetid ved hjælp af modellen med Markov-kæden.
- 2) Simulering af de forskellige hændelser, der indtræffer for hver mølle i parken. Nogle hændelser, f.eks. reparationer efter nedbrud, stopper møllen, medens andre, f.eks. servicering, kun stopper møllen under selve arbejdsprocessen. Disse forhold er illustreret i figur 3.
- 3) Der er et begrænset antal reparationshold, som arbejder efter princippet først til mølle først malet.
- 4) Når møllens levetid er slut i simuleringen, sammentælles alle de indtrufne udetider. Antallet af arbejdstimer for de involverede reparationshold sammentælles også.

Denne procedure gentages mange gange, f.eks. mellem 100 og 100000 gange for at etablere antagelige værdier for udetiden og arbejdstimerne for hele mølleparken i hele dens levetid.



Figur 3. Indtrufne servicehændelser for den n -te turbine i mølleparken

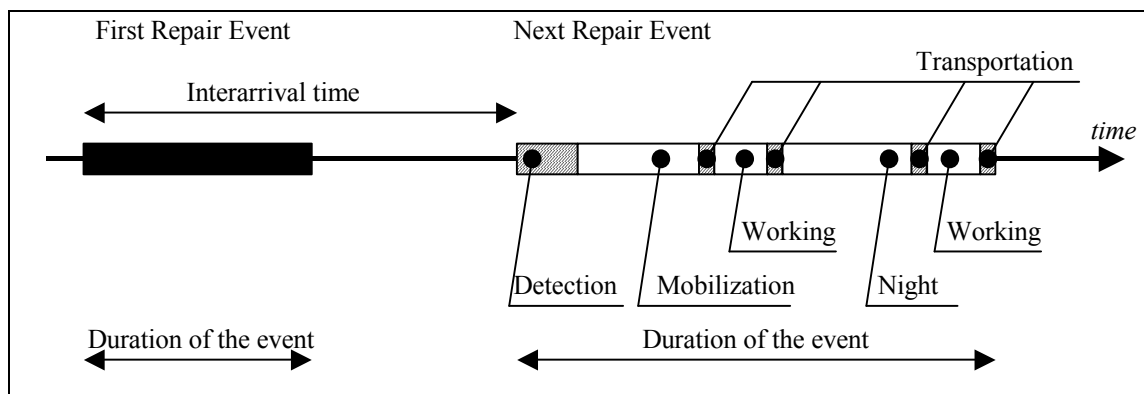
5.3.1 Modellering af enkelthændelser

En enkelt hændelse, f.eks. præventivt vedligeholdelse beskrives ved en "renewal"-proces. Dette er en proces, hvor den stokastiske variabel, der beskriver tiderne mellem hændelsernes indtræffen, er uafhængige og har samme fordelingsfunktion. For det periodiske, præventive vedligehold anvendes dog en deterministisk værdi på f. eks. 6 måneder. Der er også en anden stokastisk variabel knyttet til hændelsen, nemlig varigheden (mandtimer) af denne. For at definere en hændelse i modellen kræves værdierne af en række andre variable, som her kaldes subhændelser.

De sub-hændelser, som tilsammen udgør en hændelse, er detekteringstiden for hændelsens indtræffen, mobiliseringstiden for reparationsmandskabet, og

transporttiden med skib til mølleparken. Disse er også i simuleringen repræsenteret ved en passende og valgbar fordelingsfunktion. Eksempelvis kan det antages, at transporttiden fra den nærmeste havn til havmølleparken har en normalfordeling med en middeltid på 0,5 time og en standardafvigelse på 0,1 time. Sub-hændelserne for en reparation er afbildet grafisk i figur 4. Det er underforstået, at nogle af tiderne er afhængige af vejret.

Fordelingerne af parametrene i hændelserne og deres subhændelser er ofte ikke umiddelbart tilgængelige, men ved hjælp af eksisterende fejldatabaser kan gode skøn ofte opnås. En anden mulighed er at udnytte såkaldte ”expert judgements”. Endelig kan emnet være så betydningsfuldt for planlægning af vedligeholdelsesarbejdet for en planlagt møllepark at de omtalte data fremskaffes ved eksperimenter på stedet.



Figur 4. Komponenterne af en hændelse med dens sub-hændelser

5.3.2 Modellering af rådighedsfaktoren for en møllepark

Indenfor nærværende projekt er den nødvendige software til simuleringerne udviklet som Delphi-programmer. Markov-kæden analyseres med programmet ”PROMAR”, og selve Monte Carlo-analysen udføres med programmet ”MCWT_AVAILABILITY”. Det er PC-baserede programmer med et godt bruger-interface. Disse programmer er beskrevet nøjere i de to rapporter [10] og [11].

PROMAR arbejder direkte på de rå data fra klimamålingerne, medens MCWT_AVAILABILITY kræver input af de ovenfor nævnte data. Ved beregning af samlet mandtid er det nødvendigt at angive både antallet af reparationshold og antallet af personer på hvert hold. Der arbejdes ud fra den simple formel ”Først til mølle etc.”

5.4 Tre eksempler

Der er gennemregnet 3 eksempler under anvendelse af den Markov-model, som er afledt af de eksisterende tidsserier med klimamålinger fra Rødsand. Eksempel 2 er det, der kommer nærmest til den aktuelle møllepark på Rødsand, medens eksempel 3 med en undtagelse er identisk med eksempel 2, idet der i eksempel 3 er tilføjet et par enkeltstående havarier med en lang reparationstid,

altså hændelser, der kræver udskiftning af en eller flere hovedkomponenter i en mølle. Eksempel 1 er baseret på arbitrært anslåede parametre og er gennemregnet inden den endelige konfiguration på Rødsand var kendt. Dette eksempel er medtaget for fuldstændigheds skyld, men også for at illustrere, hvor let modellen lader sig anvende på forskellige scenarier.

Nogle af de konklusioner, der kan afledes af eksemplernes resultater kan måske forekomme overraskende, men det må erindres, at modelleringen i et vist omfang er foretaget med et svagt bestemt datamateriale. Modellen kan ganske let forsynes med nye parameterværdier, når sådanne foreligger.

5.4.1 Eksempel 1 og dets resultater

Som illustration af programmernes formåen er nedenstående eksempel gennemført med parameterværdier, som ikke nødvendigvis stemmer overens med den kommende virkelighed på Rødsand. Eksemplet belyser imidlertid med hvilken lethed andre og måske mere realistiske scenarier kan simuleres.

Som klimadata anvendtes i eksemplet de tidligere beskrevne data fra Rødsand. Der forekommer to typer af hændelser, som stopper møllen. Den ene er den præventive vedligeholdelse, som foretages på kalenderbasis, medens den anden er korrektiv vedligeholdelse ved tilfældige fejl. De nævnte parametre referer til figur 4. Der er 4 reparationshold med hver 2 mand til rådighed for arbejdets udførelse. Den planlagte vedligeholdelse finder sted med 6 måneders mellemrum, og de tilfældige fejl antages at indtræffe normalt fordelt med en middelværdi på 120 dage og en spredning på 5 dage (normalfordelingen er næppe det rigtige valg i forhold til virkeligheden). Det skal understreges, at simuleringen foregår med arbitrært valgte data og at resultaterne således ikke er anvendelige til vedligeholdelsesplanlægning; hertil vil kræves korrekte data og fordelinger.

Hændelse 1: Præventiv periodisk vedligeholdelse
Service tid pr. Gang: Deterministisk 16 mandtimer
Indtræffer: To gange om året
Indgående subhændelser: Detekteringstid (en gang pr. hændelse, log normal fordeling, $\mu = 2,00$ timer, $\sigma = 0,50$ timer), mobiliseringstid (en gang pr. hændelse, log normal fordeling, $\mu = 8,00$ timer, $\sigma = 0,50$ timer), transporttid (2 gange pr. dag), log normal fordeling, $\mu = 0,40$ timer, $\sigma = 0,10$ timer.

Hændelse 2: Korrektiv vedligeholdelse
Service-tid pr. gang: Log normal fordeling ($\mu = 2,00$ mandtimer, $\sigma = 0,80$ timer)
Indtræffer: Tid mellem hændelser er normalfordelt med $\mu = 120$ dage, $\sigma = 5$ dage
Indgående sub-hændelser: Mobiliseringstid (en gang pr. hændelse, log normal fordeling, $\mu = 8,00$ timer, $\sigma = 1,00$ timer), transporttid (2 gange om dagen, log normal fordeling, $\mu = 0,40$ timer, $\sigma = 0,10$ timer).

Analyse af disse hændelser med to personer i arbejdsstyrken giver med den foreliggende klimamodel fra Rødsand følgende resultater:

- Hændelse 1: Møllens udetid: ($\mu = 33,8$ timer, $\sigma = 18,7$ timer)
Arbejdstid: ($\mu = 26,5$ timer, $\sigma = 14,3$ timer)
- Hændelse 2: Møllens udetid: ($\mu = 17,3$ timer, $\sigma = 14,0$ timer)
Arbejdstid: ($\mu = 8,9$ timer, $\sigma = 9,7$ timer)

Resultatet af beregninger på denne model er vist i tabel 4. Der er udført en række simuleringer med de 3 skibsstørrelser på 5 forskellige størrelser af mølleparken fra 1 mølle til 100. Mølleparkens levetid er antaget at være 20 år. Det ses af tabellen, at der er en del usikkerhed på udetiden for mølleparken, især ved anvendelse af det lille eller det mellemstore skib. Variationskoefficienten, $COV = \mu/\sigma$, ligger i området 3% til 12%. Imidlertid er usikkerheden på rådighedsfaktoren for mølleparken temmelig lille. Den generelle tendens er, at rådighedsfaktoren falder med stigende antal af møller. I eksemplet kan dette formentlig forklares ved, at antallet af reparationshold er for lille. Kolonnen yderst til højre i tabellen understøtter denne antagelse. Det viste tal bruges som en indikation af tilstrækkeligheden af antallet af reparationshold; det er beregnet som forholdet mellem middelværdien af udetiden og middelværdien arbejdstiden.

Resultaterne i tabel 5 fremkom ved en simulering, som havde til formål at belyse usikkerhed som funktion af tiden siden kommissioneringen af havmølleparken. I denne simulering indgår kun det mellemstore skib. Det fremgår af resultaterne, at rådighedsfaktoren og dens usikkerhed afhænger meget lidt af tiden. I denne simulering er der 4 arbejds hold til service- og reparationsarbejdet. Dette betyder, at størrelsen af mølleparken har betydning for størrelsen af rådighedsfaktoren, da 4 hold ikke er nok ved store mølleparker.

Tabel 4. Resultater for forskellige skibstyper og størrelser af mølleparken.

Shiptype	No of turbines	Total Outtime [hours]			Total Worktime [hours]			Availability [%] $\pm 2 \times \sigma$	μ_{out}/μ_{work}
		μ_{out}	σ_{out}	COV	μ_{work}	σ_{work}	COV		
Small	1	5625	559	0.099	3959	376	0.095	96.79 \pm 0.64	1.421
	25	141760	7139	0.050	88814	3179	0.036	96.76 \pm 0.33	1.596
	50	335261	23189	0.069	169933	4810	0.028	96.17 \pm 0.53	1.973
	75	648132	53314	0.082	245921	5667	0.023	95.07 \pm 0.81	2.636
	100	1289103	149820	0.116	316637	5997	0.019	92.64 \pm 1.71	4.071
Medium	1	2316	156	0.067	1537	111	0.072	98.68 \pm 0.18	1.507
	25	59101	1662	0.028	36858	1002	0.027	98.65 \pm 0.08	1.603
	50	125180	3660	0.029	73055	1355	0.019	98.57 \pm 0.08	1.714
	75	208729	8358	0.040	108900	1693	0.016	98.41 \pm 0.13	1.917
	100	328524	17966	0.055	144453	2031	0.014	98.12 \pm 0.21	2.274
Large	1	1913	67	0.035	1203	52	0.043	98.91 \pm 0.08	1.590
	25	49254	805	0.016	29397	442	0.015	98.88 \pm 0.04	1.675
	50	103258	2158	0.021	58713	602	0.010	98.82 \pm 0.05	1.759
	75	168942	5292	0.031	87899	796	0.009	98.71 \pm 0.08	1.922
	100	258574	10505	0.041	117066	943	0.008	98.52 \pm 0.12	2.209

Tabel 5. Usikkerheden på resultaterne som funktion af tiden.

No of turbines	Time after comission	Total Outtime [hours]			Total Worktime [hours]			Availability [%] $\pm 2 \times \sigma$	μ_{out}/μ_{work}
		μ_{out}	σ_{out}	COV	μ_{work}	σ_{work}	COV		
1	1	117	30	0.256	73	21	0.288	98.66 \pm 0.68	1.603
	2	232	50	0.216	149	36	0.242	98.68 \pm 0.57	1.557
	5	581	76	0.131	382	56	0.147	98.67 \pm 0.35	1.521
	10	1155	125	0.108	764	92	0.120	98.68 \pm 0.29	1.512
	15	1737	144	0.083	1154	103	0.089	98.68 \pm 0.22	1.505
	20	2316	156	0.067	1537	111	0.072	98.68 \pm 0.18	1.507
	25	2891	183	0.063	1919	134	0.070	98.68 \pm 0.17	1.507
10	1	1049	153	0.146	531	105	0.198	98.80 \pm 0.35	1.976
	2	2246	259	0.115	1297	173	0.133	98.72 \pm 0.30	1.732
	5	5751	434	0.075	3571	295	0.083	98.69 \pm 0.20	1.610
	10	11504	553	0.048	7329	395	0.054	98.69 \pm 0.13	1.570
	15	17332	713	0.041	11125	503	0.045	98.68 \pm 0.11	1.558
	20	23062	761	0.033	14842	542	0.037	98.68 \pm 0.09	1.554
	25	29011	902	0.031	18737	641	0.034	98.68 \pm 0.08	1.548
100	1	32442	5536	0.171	4590	396	0.086	96.30 \pm 1.26	7.068
	2	69525	15168	0.218	11884	603	0.051	96.03 \pm 1.73	5.850
	5	119025	17846	0.150	33859	1066	0.031	97.28 \pm 0.81	3.515
	10	189456	17405	0.092	70538	1521	0.022	97.84 \pm 0.40	2.686
	15	261760	20388	0.078	107451	1820	0.017	98.01 \pm 0.31	2.436
	20	328524	17966	0.055	144453	2031	0.014	98.12 \pm 0.21	2.274
	25	397383	20122	0.051	181230	2525	0.014	98.19 \pm 0.18	2.193

5.4.2 Eksempel 2 og dets resultater

Eksempel 2 er udført med informationer om mølleparken på Rødsand, som de foreligger på det tidspunkt, da leverandøren er blevet valgt.

Som klimadata anvendtes også i dette eksempel de tidligere beskrevne data fra Rødsand. Der forekommer to typer af hændelser, som stopper møllen. Den ene er korrektiv vedligehold ved tilfældige fejl, medens den anden er det præventive vedligehold, som foretages på kalenderbasis. De nævnte hændelser refererer til figur 4. Der er 4 reparationshold med hver 2 mand til rådighed for arbejdets udførelse. Det planlagte vedligehold finder sted med 6 måneders mellemrum, hver anden gang et en-dags eftersyn og hver anden gang et større, todages eftersyn. De tilfældige fejl antages at indtræffe eksponentielt fordelt med en MTBF på 31 dage. Endvidere antages reparationstiden at være eksponentielt fordelt med en MTTR på 6,30 timer. (Se appendiks F).

Hændelse 1: Præventiv stor periodisk vedligeholdelse
Service tid pr. Gang: Deterministisk 2x16 mandtimer
Indtræffer: En gang om året
Indgående subhændelser: Transporttid (2 gange pr. dag),
log normal fordeling, $\mu = 0,50$ timer, $\sigma = 0,05$ timer.

Hændelse 2: Præventiv lille periodisk vedligeholdelse
Service tid pr. Gang: Deterministisk 2x8 mandtimer
Indtræffer: En gang om året
Indgående subhændelser: Transporttid (2 gange pr. dag),
log normal fordeling, $\mu = 0,50$ timer, $\sigma = 0,05$ timer.

Hændelse 3: Korrektiv vedligeholdelse
 Servicetid pr. gang: Eksponentielt fordelt med MTTR= 6,30 timer.
 Indtræffer: Tid mellem hændelser er eksponentielt fordelt med MTBF = 30,99 dage.
 Indgående sub-hændelser: Mobiliseringstid (en gang pr. hændelse), log normal fordeling, $\mu = 8,00$ timer, $\sigma = 1,00$ timer), transporttid (2 gange om dagen, log normal fordeling, $\mu = 0,50$ timer, $\sigma = 0,05$ timer)

Resultatet af beregninger på denne model er vist i tabel 6. Der er udført en række simuleringer med de 3 skibsstørrelser på 5 forskellige størrelser af mølleparken fra 1 mølle til 100. Mølleparkens levetid er antaget at være 20 år. Det ses af tabellen, at der er en del usikkerhed på udetiden for mølleparken, især ved anvendelse af det lille eller det mellemstore skib. Variationskoefficienten, $COV = \mu/\sigma$, ligger i området 2% til 8%. Imidlertid er usikkerheden på rådighedsfaktoren for mølleparken temmelig lille. Den generelle tendens er, at rådighedsfaktoren falder med stigende antal af møller. I eksemplet kan dette formentlig forklares ved, at antallet af reparationshold for det lille fartøj er for lille. Kolonnen yderst til højre i tabellen understøtter denne antagelse. Det viste tal bruges som en indikation af tilstrækkeligheden af antallet af reparationshold; det er beregnet som forholdet mellem middelværdien af udetiden og middelværdien arbejdstiden.

Resultaterne i tabel 7 fremkom ved en simulering, som havde til formål at belyse usikkerhed som funktion af tiden siden kommissioneringen af havmølleparken. I denne simulering indgår kun det mellemstore skib. Det fremgår af resultaterne, ligesom i eks. 1, at rådighedsfaktoren og dens usikkerhed afhænger meget lidt af tiden. I denne simulering er der 4 arbejds hold til service- og reparationsarbejdet. Dette betyder, at størrelsen af mølleparken har betydning for størrelsen af rådighedsfaktoren, da 4 hold ikke er nok ved store mølleparker.

Tabel 6. Resultater for forskellige skibstyper og størrelser af mølleparken.

Ship type	No. of turbines	Total Down time [hours]			Total Worktime [hours]			Availability [%] $\pm 2\sigma$	μ_{out}/μ_{work}
		μ_{out}	σ_{out}	COV	μ_{work}	σ_{work}	COV		
Small	1	15229	1356	0.089	14016	1313	0.094	91.31 \pm 0.774	1.087
	25	466699	19662	0.042	263089	4705	0.018	89.34 \pm 0.449	1.775
	50	1208828	83881	0.069	409203	4987	0.012	86.20 \pm 0.958	2.954
	75	2392811	170564	0.071	520404	3405	0.007	81.79 \pm 1.298	4.598
	100	4475326	351899	0.079	616237	6340	0.010	74.46 \pm 2.009	7.262
Medium	1	5482	535	0.098	4435	397	0.090	96.87 \pm 0.305	1.236
	25	152154	3327	0.022	112045	1712	0.015	96.53 \pm 0.076	1.358
	50	319423	7539	0.024	212193	2634	0.012	96.35 \pm 0.086	1.505
	75	505220	13936	0.028	306893	2373	0.008	96.16 \pm 0.106	1.646
	100	708840	21409	0.030	393814	5133	0.013	95.95 \pm 0.122	1.800
Large	1	4629	405	0.087	3427	216	0.063	97.36 \pm 0.231	1.351
	25	123981	1795	0.014	86205	1252	0.015	97.17 \pm 0.041	1.438
	50	255557	4442	0.017	170926	2358	0.014	97.08 \pm 0.051	1.495
	75	392423	4083	0.010	255439	1847	0.007	97.01 \pm 0.031	1.536
	100	531654	5855	0.011	336572	2885	0.009	96.97 \pm 0.033	1.580

Tabel 7. Udetid og arbejdstid som funktion af tiden efter kommissionering af mølleparker. Værdierne gælder for det mellemstore skib.

No. of turbines	Time after commission	Total Downtime [hours]			Total Worktime [hours]			Availability [%] $\pm 2\sigma$	μ_{out}/σ_{work}
		μ_{out}	σ_{out}	COV	μ_{work}	σ_{work}	COV		
1	1	246	88	0.358	155	56	0.361	97.20 \pm 1.004	1.587
	2	529	112	0.212	375	65	0.173	96.98 \pm 0.639	1.411
	5	1355	246	0.182	1049	172	0.164	96.91 \pm 0.561	1.292
	10	2885	336	0.116	2297	244	0.106	96.71 \pm 0.384	1.256
	15	4279	300	0.070	3449	185	0.054	96.74 \pm 0.228	1.241
	20	5482	535	0.098	4435	397	0.090	96.87 \pm 0.305	1.236
10	25	7179	464	0.065	5676	381	0.067	96.72 \pm 0.212	1.265
	1	3047	528	0.173	1758	464	0.264	96.52 \pm 0.603	1.733
	2	5864	678	0.116	3981	508	0.128	96.65 \pm 0.387	1.473
	5	14793	975	0.066	11247	651	0.058	96.62 \pm 0.223	1.315
	10	29180	1695	0.058	22462	1165	0.052	96.67 \pm 0.193	1.299
	15	44286	1672	0.038	34316	1046	0.030	96.63 \pm 0.127	1.291
100	20	57519	1175	0.020	44689	1334	0.030	96.72 \pm 0.067	1.287
	25	72706	1819	0.025	56269	1484	0.026	96.68 \pm 0.083	1.391
	1	31606	3004	0.095	12317	753	0.061	96.39 \pm 0.343	2.566
	2	71783	4508	0.063	34056	3556	0.104	95.90 \pm 0.257	2.108
	5	182830	12972	0.071	93762	2898	0.031	95.83 \pm 0.296	1.950
	10	365415	15936	0.044	195795	2974	0.015	95.83 \pm 0.182	1.866
	15	533900	23347	0.044	293407	1891	0.006	95.94 \pm 0.178	1.820
	20	708840	21409	0.030	393814	5133	0.013	95.95 \pm 0.122	1.800
	25	883594	43267	0.049	495455	7731	0.016	95.97 \pm 0.198	1.783

5.4.3 Eksempel 3

I eksempel 3 introduceres korrektivt vedligehold for maskinhavarier med lange reparationstider. Eksemplet er identisk med eksemplet i 5.4.2 for et skib af middelstørrelse, bortset fra at der introduceres denne ekstra fejltypen med lang reparationstid. Groft taget introduceres i alt 7 fejl med en reparationstid på 3 uger for hele parken i løbet af 20 år.

Hændelse 1: Præventiv stor periodisk vedligeholdelse
Service tid pr. Gang: Deterministisk 2x16 mandtimer
Indtræffer: En gang om året
Indgående subhændelser: Transporttid (2 gange pr. dag),
log normal fordeling, $\mu = 0,50$ timer, $\sigma = 0,05$ timer.

Hændelse 2: Præventiv lille periodisk vedligeholdelse
Service tid pr. Gang: Deterministisk 2x8 mandtimer
Indtræffer: En gang om året
Indgående subhændelser: Transporttid (2 gange pr. dag),
log normal fordeling, $\mu = 0,50$ timer, $\sigma = 0,05$ timer.

- Hændelse 3: Korrektiv vedligeholdelse
 Servicetid pr. gang: Eksponentielt fordelt med MTTR = 6,30 timer.
 Indtræffer: Tid mellem hændelser er eksponentielt fordelt med MTBF = 30,99 dage.
 Indgående sub-hændelser: Mobiliseringstid (en gang pr. hændelse),
 log normal fordeling, $\mu = 8,00$ timer, $\sigma = 1,00$ timer),
 transporttid (2 gange om dagen), log normal fordeling,
 $\mu = 0,50$ timer, $\sigma = 0,05$ timer
- Hændelse 4: Korrektiv vedligeholdelse af havari
 Servicetid pr. gang: Lognormal fordelt med $\mu = 222$ time og $\sigma = 74$ timer.
 Indtræffer: Tid mellem hændelser er eksponentielt fordelt med MTBF = 76650 dage.
 Indgående sub-hændelser: Mobiliseringstid (en gang pr. hændelse), log normal fordeling, $\mu = 37$ timer,
 $\sigma = 37$ timer), transporttid (2 gange om dagen), log normal fordeling, $\mu = 0,50$ timer, $\sigma = 0,05$ timer

Tabel 8. Resultater som i tabel 6, dog med store havarier

Ship type	No. of turbines	Total Down time [hours]			Total Worktime [hours]			Availability [%] $\pm 2\sigma$	$\mu_{\text{out}}/\mu_{\text{work}}$
		μ_{out}	σ_{out}	COV	μ_{work}	σ_{work}	COV		
Medium	1	5624	561	0.100	4545	430	0.095	96.79 ± 0.320	1.237
	25	153364	3632	0.024	112234	2429	0.022	96.50 ± 0.083	1.366
	50	318128	5973	0.019	213800	3168	0.015	96.37 ± 0.068	1.488
	75	509166	17414	0.034	309868	4065	0.013	96.13 ± 0.133	1.643
	100	721202	17217	0.024	400862	3517	0.009	95.88 ± 0.098	1.799

Resultatet af simuleringen ses i tabel 8 for skibet af middelstørrelse.

Sammenlignes disse værdier med de tilsvarende er afvigelserne for rådighedsfaktoren (availability) kun nogle få tiendedele procent. Det svarer imidlertid til nogle få promille af den samlede energiproduktion, dvs. et tab af størrelsen 50.000 MWh.

5.5 Følsomhedsanalyse for nogle vigtige parametre i Monte Carlo-simuleringen for mølleparkens rådighedsfaktor

Følsomheden er blevet undersøgt ved at introducere afvigelser fra de grundlæggende Rødsand-data for parametrene ”Middeltid mellem fejl” (MTBF), ”Reparationstid” og ”Mobiliseringstid”.

Både MTBF og reparationsraten, som er reparationstiden i minus første), antages at være (se appendiks F) eksponentielt fordelt med parametrene 0.0322654 og 0.1587301, svarende til en MTBF på 31 dage og en middelreparationstid på

6.30 timer. Det antoges at mobiliseringstiden kunne være lognormal fordelt med middelværdien 8.0 timer og spredningen 4.0 timer.

Hver af disse parametre har været varieret med faktorerne 2 og 3 med de øvrige parametre fastholdt på deres basisværdi. Resultaterne af disse simuleringer ses i tabel 8.

Tabel 9. Resultat af følsomhedsanalyse.

	Availability mean value \pm 2x standard deviation, in percent		
	Basic value	2 x basic value	3 x basic value
MTBF	96.16 \pm 0.104	91.49 \pm 0.435	84.45 \pm 0.960
Repair Time	96.16 \pm 0.104	92.98 \pm 0.441	80.16 \pm 1.555
Mobilisation time	96.16 \pm 0.104	95.02 \pm 0.133	93.44 \pm 0.202

Det ses, at rådighedsfaktoren er mest følsom overfor ændringer i middeltiden for reparation, medens den er mindst afhængig af mobiliseringstiden. Dette kan forklares ved valget af en lav mobiliseringstid på 8 timer.

6 PC-programmer for modellerne

Ved simuleringerne er som nævnt i 5.3.2. anvendt programmerne ProMar og MCWT_availability, som er udviklet i Delphi indenfor projektets rammer. De to programmer er beskrevet i Risø-I-rapporterne [10] og [11]. Disse rapporter indeholder også detaljerede brugermanualer.

7 Verifikation af klimamodellen

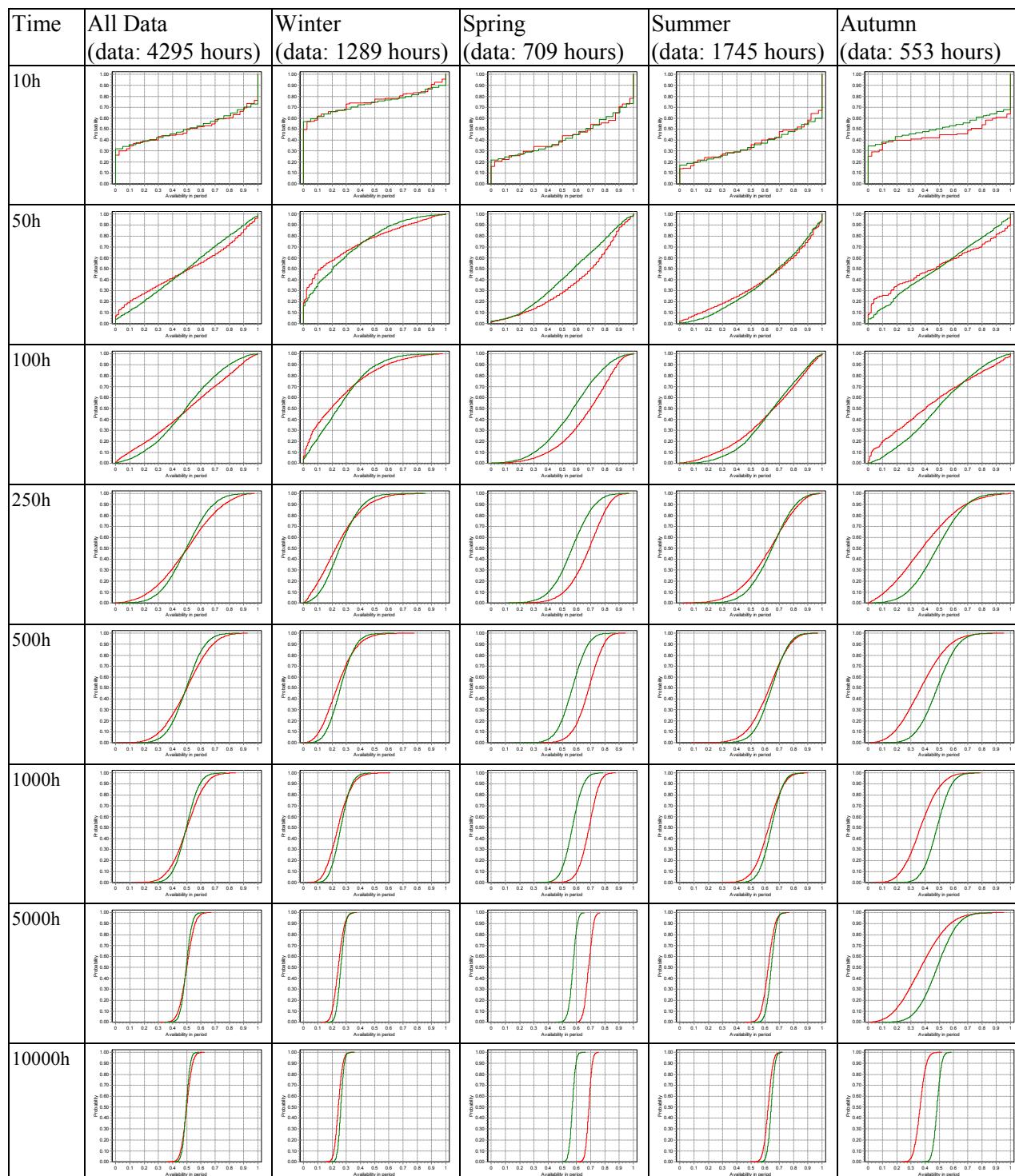
7.1 Verifikation ved hjælp af re-samplede data

Verifikationen af Markov-modellen er i dette afsnit baseret på en ”moving block re-sampling” metode. Adgangen til mølleparken bestemmes ved hjælp af de indsamlede måledata, hvorefter beregningen gennemføres med Markov-modellen. Der ses på perioder med varigheder mellem 10 og 10000 timer. Modellen anvendes med et vindue på 8 timer og en størrelse på blok resamplingen på 100 samples, dvs. 50 timer.

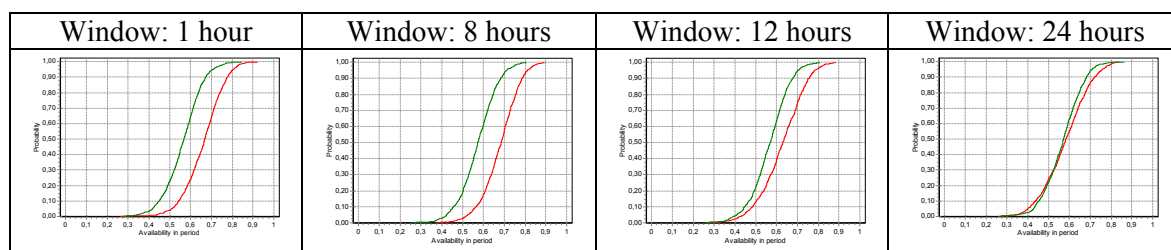
Resultaterne af verifikationsanalysen er vist i figur 5, hvor den kumulative fordeling for adgangen til mølleparken vises som betinget på årstiderne, forår, sommer, efterår, vinter og på hele året.

Det ses heraf, at modellen virker bedst for perioderne sommer, vinter og hele året, medens den er noget problematisk for perioderne forår og efterår. Det skyldes formentlig, at de førstnævnte er baseret på måleperioder med mange måleværdier, medens de sidstnævnte er baseret på mere mangelfulde målinger; f. eks. omfatter forårets målinger kun 709 timer ud af 2160 mulige. Resampling med så begrænset et sæt data kan ikke give uafhængige resultater.

For at undersøge forskellen mellem modellens forudsigelser og de re-samplede værdier fra originalmålingerne blev der udført en følsomhedsanalyse på forårs-værdierne. Her blev vindueslængden varieret mellem 1time og 24 timer, for en samlet tid på i alt 500 timer. Det ses af figur 6, at et vindue på 24 timer giver det bedste sammenfald. Dette viser, at det er meget vigtigt, at brugeren af modellen vælger længden af vinduet med stor omhu.



Figur 5. Kumulativ fordeling for adgang til mølleparken (rød=model, grøn= målt).



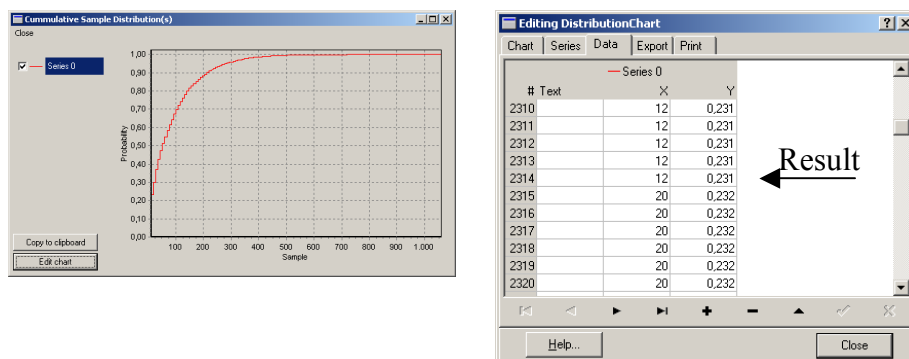
Figur 6. Følsomhedsanalyse for Forårets data.

7.2 Verifikation ved sammenligning med Dansk Hydraulisk Instituts "vejrvinduer"

Dansk Hydraulisk Institut (DHI) har også udført en analyse af klimaet på Rød-sand. DHI har på grundlag af resultaterne defineret et vejrvindue som den procentdel af et "standardår", hvor vindstyrken er under en vis værdi, idet dog kun vinduer på over 12 timer medregnes.

Disse vinduer kan også forudsiges med Markov-modellen fra nærværende projekt under anvendelse af den bemeldte vindhastighed og de kalendertimer, arbejdets udførelse tager. Se detaljer herom i ProMar users guide [10].

Resultaterne af analysen er vist i fig. 7.



Figur 7. Resultat af beregninger af DHI's vejrvinduer

Resultaterne for alle årstiderne er vist i tabel 10. På grund af de tidligere omtalte problemer med mangel på data, er der kun regnet med kvartaler.

DHI's vejrvinduer er mere udførligt beskrevet i appendiks G.

Tabel 10. Vejrvinduer af mere end 12 timers varighed angivet som brøkdelen af perioden

Weather window for the specified wind speed				
Season	8 m/s	10 m/s	12 m/s	15 m/s
Winter (dec, jan, feb)	19 %	40 %	68 %	88 %
Spring (mar, apr, may)	57 %	81 %	97 %	100 %
Summer (jun, jul, aug)	51 %	82 %	91 %	100 %
Autumn (sep, oct, nov)	59 %	82 %	93 %	98 %

DHI's resultater var som nævnt anført på månedsbasis. Til sammenligning med tabel 10 angives i tabel 11 DHI's værdier omregnet til kvartalsgennemsnit (årstider) .

Tabel 11. DHI- vejrvinduer af mere end 12 timers varighed angivet som brøkdelen af perioden.

Weather window for the specified wind speed				
Season	8 m/s	10 m/s	12 m/s	15 m/s
Winter (dec, jan, feb)	35 %	56 %	74 %	92 %
Spring (mar, apr, may)	47 %	71 %	86 %	97 %
Summer (jun, jul, aug)	57 %	80 %	93 %	99 %
Autumn (sep, oct, nov)	44 %	66 %	82 %	95 %

Afviselserne mellem de to tabeller kan formentlig skyldes, at DHI-dataene er afledt af et standardår, medens nærværende rapport's tal kommer fra den tidligere omtalte måleperiode.

Referencer

1. Petersen, K.E. et al, Driftspåidelighed af mindre vindmøller. Risø-M-2872, 1990.
2. Christensen, C.J. og Jensen, P.H., EFP-92/ Sikkerhedssystemer for Vindmøller. Risø-I-687(DA), 1993.
3. Kongsø, H.E., Kozine, I.O. and P. Christensen, The EFP-94 project on safety for wind turbines. Methods for evaluation of failure modes and reliability. Risø-R-915(EN), 1996.
4. Kozine, I.O., Christensen, P. and Winther-Jensen, M., Failure database and tools for wind turbine availability and reliability analyses. The application of reliability data for selected wind turbines. Risø-R-1200(EN), 2000.
5. Jensen, F.V., An Introduction to Bayesian Networks, UCL Press, London, 1996.
6. Nielsen, S.R.K., Lecture Notes for a Course in Stochastic Processes, Aalborg University, 1996.
7. Cox, D.R., Renewal Theory, Methuen & Co, LTD, London, 1962.
8. Dalsgaard Sørensen, J & Sterndorff, Martin J. Consistent Stochastic Modelling of Meteocean Design Parameters, Proceedings of OMAE 2000.
9. Elzbieta M. Bitner-Gregersen & Øistein Hagen, Aspects of Joint Distribution for Metocean Phenomena at the Norwegian Continental Shelf, ASME Paper N°. OMAE-2000-6021.
10. Thøgersen, Moretn L., Users Guide and program Description for the ProMar Software, Risø-I-1880 (EN), December 2001.
11. Thøgersen, Morten L., Users Guide and program Description for the MCWT_Availability Software, Risø-I-1881 (EN), December 2001.
12. R.J. Barthelmie, R.J., Lange, B. & Nielsen, M., Wind Ressources at Rødsand and Omø Stålgrunde, Risø-I-1456, 1999.
13. Lange, N., Data Analysis of the Rødsand Field Measurements, Risø-I-rapport, August 2000.

Appendix

A Projektbeskrivelse fra ansøgning

Vedligeholdelse af hav-vindmølleparker vil frembyde andre problemer end enkelte landbaserede vindmøller gør. Korrigerende vedligeholdelse, altså reparation af indtrufne fejl, bliver kostbart p. gr. af transportomkostninger for reparatører og reservedele til mølleparkerne. I dårligt vejr vil reparation måske være umulig. Der vil være brug for en nøje afvejning af kravet om en høj rådighedsfaktor og en minimering af vedligeholdelsesomkostningerne. Det kan blive meget vigtigt, at pålideligheden af møllernes forbindelser til el-nettet og overvågningsudstyret med dets tilhørende data-transmissionsudstyr er høj.

Møllerne må opfylde visse *pålidelighedskrav*, både enkeltvis og betragtet som gruppe, for at elskaberne kan planlægge både produktionen og vedligeholdelsen af mølleparkerne i overensstemmelse med den planlagte strategi herfor. Tilgængeligheden af møllen vil, bortset fra perioder med vindstille, afhænge både af down-time på grund af fejl og på grund af nedlukning beordret fra kontroludstyret eller beskyttelsessystemet samt af forlænget reparationstid p. gr. af dårligt vejr.

De ovennævnte pålidelighedskrav medfører, at der f. eks. i udbudsmaterialet for licitation ved opførelse af mølleparker må stilles detaljerede krav til møllernes pålidelighed. Disse krav vil hænge nøje sammen med konfigurationen af møllerne og deres hjælpesystemer og krav til pålideligheden af de enkelte møllekomponenter. En *overordnet pålidelighedsanalyse* af hele mølleparken baseret på pålideligheden af de enkelte møller og igen på pålideligheden af de enkelte møllekomponenter kan ligge til grund for de krav, der stilles. Ved vurdering af indkomne licitationstilbud fra fabrikanterne af møllerne vil modellen være anvendelig ved kontrol af, at de tilbudte egenskaber kan realisere de stillede pålidelighedskrav.

For havmølleparker gør en særlig række forhold gældende:

- Krav om en samlet værdi for rådighedsfaktor for mølleparken kan tillade mange frihedsgrader i optimering af pålidelighed og vedligehold.
- Redundans i enkeltmøllernes forbindelse til el-nettet
- Fjernovervågning af hovedkomponenter nødvendig, eventuelt med avanceret signalanalyse.
- Pålideligheden af overvågningsudstyret og det tilhørende datatransmissionsudstyr bliver betydningsfuld.
- Adgangsforhold under vanskeligt vejr er en betydelig faktor.

Modelopbygningen vil blive gennemført i 12 underprojekter samlet i 5 aktiviteter (A-E) som anført herunder:

A. Systembeskrivelse

- Beskrivelse af konfigurationer, møllernes effekt, geometriske størrelse, placeringsmønstre
- Beskrivelse af el-nettet og forbindelser til el-nettet (fejldata fra SEAS)
- Beskrivelse af overvågningssystemer og deres data-transmissionsudstyr
- Beskrivelse og vurdering af adgangsforhold (Umulige vejrtyper: Vind, bølger, frost, overisning).

B. Opbygning af fejlmodel

- Vurdering af uønskede hændelser
- Fremskaffelse af fejldata ("live", "generiske", "expert judgements")
- Konstruktion af fejltræ (inkluderende enkeltmøller, el-net, overvågnings- og transmissionsudstyr samt adgangsforhold)
- Vurdering af drifts- og reparationsforhold ("modes" i fejltræ)

C. Beregninger

- Beregning af availability (rådighedsfaktor) for mølleparken
- Iterativ bestemmelse ved hjælp af tilbageregning fra design-skrav (specificeret/krævet samlet availability) til pålidelighed af møller og deres komponenter

D. Valg af computer-platform

- Valg og anskaffelse af passende hardware/software, f.eks. PC/Delphi.

E. Rapportering

- Rapportering til Energistyrelsen og projektdeltagerne samt formidling til omverdenen.

B Afklarende spørgsmål og foreløbige svar

Haslev den 4. juni 1999

Pålidelighedsmodel for havmølleparker

Generelt

En meget stor del af forudsætningerne for opstilling af en pålidelighedsmodel er baseret på oplysninger om selve vindmøllen.

Spørgsmålene nedenfor er lavet ud fra en foreløbig indikation af, at der vil blive tale om følgende:

1. Store "standardmøller" (1,5 til 2 MW).
2. "Standardstyringer" (à la den type, MW møllerne p.t. er udstyret med).
3. Tilslutning til et 132 kV "standard" (AC) net.
4. Møllerne forsynes (af SEAS?) med et uafhængigt? overvågnings-system, som overvåger en række definerede parametre, men som ikke direkte påvirker vindmøllens drift.
5. Hele mølleparken skal kunne reguleres fra et kontrolrum.
6. Hver enkelt vindmølle skal kunne reguleres fra et kontrolrum.

Hvis disse forudsætninger er helt forkerte eller mangelfulde, skal noget af det nedennævnte nok tages op til revurdering.

Specifikt ang. prioritering af spørgsmålene

De oplysninger, som er ønskelige, hvis en rimelig pålidelighedsanalyse skal gennemføres, er angivet på skemaform nedenfor. Uddybende kommentarer til skemaets punkter er givet umiddelbart efter selve skemaet.

Spørgsmålene er opstillet i 6 prioriterede kategorier, A-F. Besvarelsen af spørgsmålene i de første kategorier A-D er af primær betydning for udarbejdelsen af pålidelighedsmodellen, medens kategori E og F indledningsvis kan baseres på skøn.

Bemærk at der tages udgangspunkt i de foreløbige undersøgelser for Rødsand.

Oversigt over aktuelle elementer til afklaring for pålidelighedsmodel for havvindmølleparker

1 A. Møller	2 B. Elsystem	3 C. Overvågn./mølle	4 D. Kommunikation	5 E. Vedligehold	6 F. Site
1. Antal i park: 75 2. Klima (ej vind): 1) 3. Levetid: 20 år 4. Pålidelighed: ? 5. Effekt: 2 MW 6. Højde: 60 m 7. Årsproduktion: ca. 475 GWh 8. Fundament: 1) 9. Landgang: 1) 10. Regulering: Pitch eller aktiv stall 11. Generatortyper: Asynkron 12. Netkvalitet: ? 13. Sikkerhedssystem: 1) 14. SRO: 2) 15. Nødstrøm: 1) 16. Link til fra styring til overvågning: ? 17. Andre komponentkrav: 1) 18. Max. vægt / komponent: 1) 19. Udskiftning af komponenter: Kedlings- 20. Kædetilslutnings-strategi: 1) 21. Bremsning: 1)	1. Konfiguration :2) 2. Spænding: 30 kV 3. Netfejl som stopper møller: 1) 4. Frekvens	1. Hvad skal overvåges?: 2) 2. Er der sammenfald med styring (samme transducere)? : 2) 3. Dataopsamlings-system: 1) 4. Nødforsyning: 1)	1. Nødforsyning: 1) 2. Opbygning: 1) 3. Konfiguration : 2) 1): Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret ’99. 2): Se efterfølgende sider	1. Vedligehold (strategi) 2. Fartøj (skib/helikopter) 3. Kraner 4. Landgang 5. Personale - Antal - Uddannelse - Vagtbetingelser (rådighed) - Arbejdsregler	1. Geometri / konfiguration 2. Hvor / geografi / omgivelser 3. Vanddybder 4. Klima: - Vind - Bølger - Strøm - Sigbarhed - Tilfrysning - Overisning - Lyn - Temperatur

Ad. A Vindmøllen

Nedenfor er listet de overordnede parametre, som SEAS sandsynligvis kan give oplysninger om. Det drejer sig om følgende (krav):

1. Antal vindmøller pr. park. Skal møllerne i en park være ens? *Ja, der forventes ca. 75 stk á 2 MW pr. vindmøllepark*
2. Klimatiske forhold (undtagen vindforhold): Krav til korrosionsklasse, overisning (vinger, krøjefaner, anemometre mv.), lynbeskyttelse mv. Desuden krav til indeklima i møllehat, tårn, (styring). *Kan generelt tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99. Lynbeskyttelse skal følge DEFU rekommandation 25.*
3. Beregnet levetid: Dels for vindmøllen generelt, dels for de væsentligste komponenter. Kræves bestemte standarder overholdt (fx. med hensyn til fraktilværdier, partialkoefficienter osv.). *Som udgangspunkt 20 år. Mere detaljeret kan det tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
4. Krav til pålidelighed (fx. som tilladelig udetid pr. år). *Der stilles formentlig krav om en rådighedsfaktor på 98%*
5. Max. effekt (kW) pr. mølle. Mulighed for overbelastning? *2 MW (p.t.). Der overvejes mulighed for at udnytte op til 110% i kortere tid (måske af størrelsesordenen 10 min.)*
6. Navhøjde (m). *Ca. 60 m*
7. Forventet årsproduktion pr. mølle (kWh/år og evt. kWh/år/m²) *Foreløbigt ca. 475 mill. kWh pr år*
8. Fundament: Hvilke typer er acceptable. *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
9. Landgang: Er der krav til type og/eller anvendelighed (fx. at landgangen skal kunne benyttes ved vindhastigheder op til 10 m/s og bølger op til 2 m). *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
10. Effektregeringssystem (hardware med hensyn til stall, pitch, variabelt omdrejningstal mv.: Er der frit valg eller krav fx. om drejbare vinger. *Det bliver med bladdrejning i en eller anden udformning. Pitch eller aktiv stall. Der bliver næppe omdrejningsregulering udover f.eks. OptiSlip, hvis det bliver Vestas.*
11. Generator: Acceptable generatortyper (fx. asynkron, synkron osv.), en eller flere generatorer, køling mm. *P.t. er det kun asynkronmaskiner, der er i betragtning til den første havmøllepark*
12. Netkvalitet (det overordnede spørgsmål er, om og i hvilket omfang der er adskillelse af mølleparkens net og nettet på land): Fx. spænding og tilladelige spændingsvariationer, frekvens og tilladelige frekvens variationer, tilladelig fase asymmetri osv. for de enkelte vindmøller. Endvidere hvilke netvariationer/-afvigelser, der skal få møllen til at stoppe. *Dette er nøje specificeret i "Tilslutningsbetingelser for vindmølleparker tilsluttet eltransmissionsnettet", Elkraft System, som udkommer om kort tid*
13. Sikkerhedssystem (bremsesystemer): Tilladelig svigthyppighed, redundans, type (skal der fx. være aerodynamisk virkende bremse?), krav til evt. mekanisk bremse (skal vindmøllen kunne bringes til standsning under alle vindforhold?), krav til/om afprøvning, kontrol af tilstand. *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*

14. Styring, regulering og overvågning (SRO): Hvilke parametre *skal* overvåges? Er der krav til styringen og dens funktion, er der krav til overvågningsdelen (fx. krav til tider/hyppigheder, redundans (fx. krav om to krøjefaner) osv.)). *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
15. Nødstrøm: Er der krav om nødstrømsanlæg, fx. for SRO og ventiler i sikkerhedssystem eller for krøjesystem. *Sandsynligvis. Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
16. Link til uafhængigt overvågningssystem: Hvilke parametre overføres, skal der være redundans mellem vindmøllens SRO og overvågningssystemet. *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99. Men kravet er at fejl på et tilstandsovervågningssystem ikke må hindre styresystemets basale funktioner, så det undgås at vindmøllen fejler.*
17. Evt. krav til andre komponenter: Fx. pålidelighed (er hydraulik fx. "forbudt"), overvågning. *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
18. Evt. krav i forbindelse med montering/vedligehold: Er der krav til max. vægt eller størrelse pr. komponent, er der krav til intervaller for vedligehold. *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
19. Hvorledes og hvornår foretages udskiftning af komponenter (fejl, levetid opbrugt, forebyggende). Skal der bestilles kranhjælp eller vælges at modulopbygge store komponenter for let udskiftning. *Der sættes på at alle komponenter kan skiftes fra kabinens egen kran!*
20. Hvilken vedligeholdelsesstrategi skal følges. Specificerer Seas selv en vedligeholdelsesplan eller skal fabrikantens vedligeholdelsesplan følges. Foregår vedligeholdelse ad hoc? *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
21. Hvilke bremsesystemer foreskrives. *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99, men sandsynligvis de "sædvanlige".*

Ad. B Elsystem

1. *Konfiguration* kan angives som et diagram. Det skal være så detaljeret, at man kan se transformerne i de enkelte møller, kablerne mellem dem med eventuelle ledningsadskillere og effektafbrydere og en eventuel central transformer med tilhørende koblingsudstyr.

Eventuel fælles kabelføring med kommunikationsanlægget ønskes oplyst. *Der påregnes lyslederkabler indlagt i højspændingskablerne evt. adskilte kabler men samført*

2. *Spændingerne* på møllegeneratorens udgang, på mølletransformerens udgang og transmissionsspændingen til land ønskes angivet.
 - generatorspændinger: 690 - 950 V (afhængig af fabrikat)
 - opsamlingsnet i vindmøllepark: 30/33 kV
 - Transmissionskabel: 132 Kv
3. Talværdier for *netfejl*, der stopper møller ønskes oplyst enten som absolutte værdier eller tolerancer for spænding, frekvens og fase. *Der forventes p.t.*

ca. 1 betydende netfejl i transmissionsnettet pr. måned, som vil have betydning for vindmølleparken! Herom senere.

4. Overvejelser om frekvensstabilitet. *Det burde ikke være af betydning for første park, men kan blive det ved fuld udbygning.*

Ad. C Overvågning af den enkelte vindmølle

Overvågningsenheden regnes her som uafhængig af vindmøllens styring, regulering og overvågning (SRO).

1. Hvad *skal* overvåges og i hvilket omfang (fx. redundans, samplingsfrekvens, tolerancer mm.) :
 - Generator (temp. i generator, køling, strøm kvalitet mv.). *Formentlig kun lejeovervågning, evt. også viklingstemp.*
 - Gear (fx. temp. i sump og i lejer, køling/smøring, vibrationer/frekvenser). *Formentlig lejeovervågning, vibration og temp., afhængig af leverandørens koncept*
 - Hovedlejer (temp., vibrationer). *Mindst vibrations- og frekvensovervågning*
 - Energiproduktion og/eller regulering. *Næppe*
 - Vibrationer i øvrigt. *Sikkert*
 - Laster. *Måske*
 - Andet. *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
2. Hvilke informationer overtages fra eller deles med vindmøllens styring? *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
3. Hvordan samles, sendes og gemmes informationerne. *Via netværk i parken*
4. Nødstrømsanlæg: Er der nødstrømsforsyning til overvågningsenheden i hver vindmølle? Må den være sammenfaldende med nødstrømsanlægget for møllen (hvis der findes et). *Sandsynligvis ja til begge, men kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*

Ad. D Kommunikation

1. *Nødforsyning.* Oplysninger om hvilke funktioner, der skal kunne opretholdes med nødforsyningen. Oplysninger om den tekniske udførelse af nødforsyningen *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
2. *Opbygning.* Dataindsamlingsudstyr i møllen, hardware interface til nettet i hver mølle, protokoller for datatransmission på højt og lavt niveau og nødvendig transmissionshastighed ønskes beskrevet. *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*

3. *Konfigurationen af "intranettet" mellem møllerne med redundans og pass-by muligheder ønskes beskrevet. Endvidere ønskes oplyst, om "intranettet" går ind til land eller samles i en off-shore server med en eller flere forbindelser til land. Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*

Som for el-nettet ønskes oplyst, om de to net har noget til fælles, f.eks. fælles fremføring eller endog måske et fælles kabel. *Der påregnes lyslederkabler indlagt i højspændingskablerne evt. adskilte kabler men samført*

Ad. E Vedligehold

1. *Vedligeholdsstrategi. Pålidelighed og vedligehold hænger ofte sammen. Jo mere forebyggende vedligehold jo bedre pålidelighed af systemet, men dette er ofte ikke det optimale, da det er dyrt og udetiden pga. vedligehold bliver for stor.*

Den optimale vedligeholdsform er systematisk vedligehold, som også kan være baseret på RCM (Reliability centred maintenance)

Systematisk vedligehold er en blanding af:

Periodisk vedligehold

Tilstandsbaseret vedligehold

Lejlighedsbaseret vedligehold

'Havaribaseret' vedligehold

Ved havbaserede vindmølleparker vil der være det problem at man pga. vejret ikke altid kan komme til at reparere møllen, når der er et behov. Vedligeholdsstrategien vil derfor være anderledes end for landbaserede anlæg og vil nok indeholde en del lejlighedsbaseret vedligehold.

Men nogle spørgsmål:

1. Interval for periodisk vedligehold? (hele år ? hvor mange ?) *Mål for første park: 1 år*
2. Hvor meget overvågning af tilstand ? (ingenting.....meget) *I vist omfang, afhængig af fabrikat*
3. Hvordan kommer man ud til møllerne? (skib, helikopter,...) Formentlig kun skib, men *kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
4. Hvornår kan man ikke komme ud til møllerne ? (grænseværdier) *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*
5. Påtænkte krantyper. *Kabinekran*
6. Påtænkte typer af landgangbroer etc. *Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*

Der kan senere stilles spørgsmål til:

1. *Personale* (fast eller løst)
2. Udformning af vedligeholdsrapporter

Ad. F Site

Som det ses af skemaet er der spørgsmål vedrørende:

1. *Konfiguration af møllerne? Formentlig matrix. Kan tidligst besvares ved den endelige projektgodkendelse*
2. *Hvilke sites planlægges, og hvor? Rødsand, Omø, Gedser*
3. *Hvad er vanddybden? Hvor?*
4. *Klimaet , som jo har betydning for vedligehold. Kan tidligst besvares med færdiggørelsen af forprojektet i efteråret '99*

C Fejltræsmodel. Regneark for en enkelt mølles tilgængelighed

Det udviklede og nedenfor beskrevne program kan anvendes til forudsigelse af *middelrådighedsfaktoren* af en møllepark på havet som funktion af *møllekomponenternes* pålideligheder og den heraf afledede *middeltilgængelighed* for en enkelt mølle, varighed af møllestop p.g.a. præventivt og korrektivt *vedligehold* af møllerne samt af *vejret* og dets forventede *udvikling*. Det må nævnes, at der er foretaget en del forenkende antagelser ved indpasning af møllernes og vejrets egenskaber i de udviklede metoder.

Til rådighed betyder her, at en møllepark kan producere el, hvis der er vind og fravær af udefra kommende forhindringer.

Middelrådighedsfaktoren defineres som den brøkdel af den installerede effekt, der i middel er til rådighed på årsbasis for mølleparken.

Tilgængelighed defineres her som rådighedsfaktoren for en enkelt mølle (availability).

Præventivt vedligehold er tidsbaseret, planlagt vedligehold.

Korrektivt vedligehold er afhjælpning af fejl indtrådt uventet og på trods af det præventive vedligehold.

Beregning af rådighedsfaktoren for mølleparken

Rådighedsfaktoren for mølleparken kan beregnes ud fra tilgængeligheden for en enkelt mølle. Antallet af fejlede møller til en given tid kan med en rimelig tilnærmelse antages at følge binomialfordelingen, se f.eks. field "C23" i sheet 15. Herved kan sandsynligheden for at 0, 1, 2, ... møller er stoppet beregnes. Med de små utilgængelighedsværdier, der påregnes for enkeltmøllerne, viser det sig i praksis, at situationer med over 4 møller stoppet ikke bidrager væsentligt til rådighedsfaktoren. Middelværdien i binomialfordelingen findes let som produktet af antal møller og enkeltmøllens tilgængelighed.

To betydningsfulde fejlmuligheder er ikke medregnet. Den ene er en fejl på el-forbindelsen til land. Den vil naturligvis umuliggøre rådighed af parken, så den bidrager direkte med fejlens kalendertid til parkens nede-tid. Den anden fejlmulighed, som ikke kan udelades, er fjernkommunikationssystemets mulighed for fejlagtig at stoppe mølleparken.. Begge fejlmuligheder kan imidlertid behandles for sig selv.

Tilgængelighed for en enkelt mølle

Det udviklede regneark forudsætter p.t. at nede-tiden for de forskellige uforudsete fejl er kendt, så den som en konstant kan indsættes i skemaet. Et bedre skøn over disse tal bør naturligvis anvendes i konkrete tilfælde. Med en fast

reparationstid τ og en fejlrate λ kan utilgængeligheden beregnes som $\lambda\tau/(1+\lambda\tau)$, se f.eks. coloumn "E" i sheet 15.

I UVE-97 projektet, som er omtalt i hovedrapportens ref. 4, er der udviklet en metode til beregning af tilgængeligheden for NEG_MICON's møller i størrelsen 750-1500 kW. Disse møller er alle konstrueret efter samme koncept. Metoden opdeler møllen i 14 hovedkomponenter. Hver af disse er desuden af metoden opdelt i deres del-komponenter. Denne metode vil blive brugt i det følgende. På hovedkomponent-niveau kan den bruges for de fleste møller på markedet i dag.

Da hver af hovedkomponenterne har en afgørende betydning for møllens mulighed for at producere el, antages det at de fejlmæssigt, logisk er forbundet i serie.

Da der ikke er redundans i nogen af de 14 hovedkomponenter, kan deres del-komponenter også antages at være fejlmæssigt, logisk serieforbundne.

Til denne opgave er beregningen af enkeltmøllens tilgængelighed implementeret i et Excel regneark. Excel indeholder alle de nødvendige faciliteter og funktioner hertil. Regnearket hedder *WTB-availability.xls*. Ved at beregne utilgængeligheden opnås to beregningsmæssige fordele. Alle fejl er serieforbundne, og da fejlratene er små, kan sandsynlighederne blot adderes i stedet for den mere korrekte fremgangsmåde, f. eks. coloumn "E" i sheet 15.

Regnearket kan bruges på to måder. Hvis alle data er kendte, kan møllens tilgængelighed beregnes. Hvis modsat en vis tilgængelighed ønskes ved design eller udbud, kan man ved passende indsætning af værdier undersøge, hvad der skal forlanges af komponenterne for at opnå en given tilgængelighed. Sidstnævnte fremgangsmåde er lettest på hovedkomponent-niveau (sheet 15), men lader sig også praktisere til del-komponentniveau (sheets 1-14), -omend med mere arbejdsindsats.

Regnearket kan bruges til grove overslag eller mere forfinede beregninger. De grove overslag foretages direkte i Sheet 15, hvor MTBF og nede-tid kan indsættes for hver af de 14 hovedkomponenter. Ved de finere beregninger indsættes lignende værdier for del-komponenterne.

Regnearket giver som slutresultat møllens tilgængelighed under hensyntagen til uforudsete fejl, som giver anledning til møllestop og nødvendigt korrektivt vedligehold. Desuden angives middelfrædighedsfaktoren for mølleparken.

Formler og anvendte funktioner kan på vanlig vis i Excel iagttages ved klik på de relevante felter i skemaet. Regneresultaterne opdateres, også på vanlig Excel-vis, direkte, når input-data ændres.

De anvendte talværdier i skemaerne er helt arbitrært valgt og tjener kun til illustration af fremgangsmåden.

Code	Styring	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
S1	Net	1	1	0.000114142
S2	Relækort	1	1	0.000114142
S3	Transformerkort	1	1	0.000114142
S4	TAC-Computer	1	1	0.000114142
S5	WP3000	1	1	0.000114142
S6	WP2060	1	1	0.000114142
S7	Kommunikation	1	1	0.000114142
S8	Nødstop	1	1	0.000114142
S9	Maksimalafbryder	1	1	0.000114142
S10	Relæer/kontaktorer	1	1	0.000114142
S11	Multistik	1	1	0.000114142
S12	Modem	1	1	0.000114142
S13	Lynbeskyttelse	1	1	0.000114142
S14	Brokopling	1	1	0.000114142
S15	Fasebatteri	1	1	0.000114142
S16	E-prom	1	1	0.000114142
S17	Motorværn	1	1	0.000114142
S18	Kontaktor	1	1	0.000114142
S19	Thyristor	1	1	0.000114142
S20	Sikringer	1	1	0.000114142
S21	Program	1	1	0.000114142
Unavailability				0.002396987
Availability				0.997603013

Code	Nacelle	MTBF år	Nede-tid timer	Unavaialbility
N1	Bolte	1	1	0.000114142
N2	Vibrations-sensor	1	1	0.000114142
N3	Topboks	1	1	0.000114142
N4	Kabler	1	1	0.000114142
N5	Kabeaflastnig	1	1	0.000114142
N6	Multistik	1	1	0.000114142
Unavailability				0.000684853
Availability				0.999315147

Code	Mekanisk bremse	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
B1	Bolte	1	1	0.000114142
B2	Bremseskiver	1	1	0.000114142
B3	Bremseklodser	1	1	0.000114142
B4	Filter	1	1	0.000114142
B5	Hydraulikstation	1	1	0.000114142
B6	Hydraulikslanger	1	1	0.000114142
B7	Ikke-returnventil	1	1	0.000114142
B8	Magnetventil	1	1	0.000114142
B9	Motor	1	1	0.000114142
B10	Micro switch	1	1	0.000114142
B11	Olie	1	1	0.000114142
B12	Overløbsventil	1	1	0.000114142
B13	Trykswitch	1	1	0.000114142
B14	Bremsescoop	1	1	0.000114142
B15	Akkumulator	1	1	0.000114142
Unavailability				0.001712133
Availability				0.998287867

Code	Vinger	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
V1	Bolte	1	1	0.000114142
V2	Vinge tip guides	1	1	0.000114142
V3	Vinge cylinder	1	1	0.000114142
V4	Vinge tip spring	1	1	0.000114142
V5	Vinge tip	1	1	0.000114142
V6	Vinge root	1	1	0.000114142
V7	Wire	1	1	0.000114142
V8	Surface	1	1	0.000114142
V9	Forkant/bagkant	1	1	0.000114142
V10	Sensor	1	1	0.000114142
V11	Lynbeskyttelse	1	1	0.000114142
Unavailability				0.001255564
Availability				0.998744436

Code	Tårn	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
T1	Bolte	1	1	0.000114142
T2	Laskeplader	1	1	0.000114142
T3	Snoede kabler	1	1	0.000114142
T4	Kabler	1	1	0.000114142
T5	Kabelafasting	1	1	0.000114142
Unavailability				0.000570711
Availability				0.999429289

P1	RC-enhed	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
P2	Temperaturmodul	1	1	0.000114142
P3	Transformer	1	1	0.000114142
P4	Triggerkort	1	1	0.000114142
Unavailability				0.000342427
Availability				0.999885858

Code	Krøjesystem	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
K1	Krøjegear	1	1	0.000114142
K2	Bremse	1	1	0.000114142
K3	Lejer, pakninger	1	1	0.000114142
K4	Motor	1	1	0.000114142
K5	Tænder	1	1	0.000114142
K6	Sensor	1	1	0.000114142
K7	Aftasterlade	1	1	0.000114142
K8	Smørenipler	1	1	0.000114142
Unavailability				0.000913138
Availability				0.999086862

Code	Hovedaksel	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
H1	Bolte	1	1	0.000114142
H2	RPM sensor beslag	1	1	0.000114142
H3	Carbon bøsning	1	1	0.000114142
H4	Lejer, pakninger	1	1	0.000114142
H5	RPM sensor	1	1	0.000114142
H6	Slip ring	1	1	0.000114142
H7	Olie/fedt pumpe	1	1	0.000114142
H8	Hovedleje	1	1	0.000114142
H9	Klemmeelement	1	1	0.000114142
H10	Smørenipler	1	1	0.000114142
H11	Kobberbørste	1	1	0.000114142
Unavailability				0.001255564
Availability				0.998744436

Code	Gearkasse	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
G1	Bolte	1	1	0.000114142
G2	Støddæmper	1	1	0.000114142
G3	Split bushing	1	1	0.000114142
G4	Lejer, pakninger	1	1	0.000114142
G5	Olie	1	1	0.000114142
G6	Suspension	1	1	0.000114142
G7	Temperatursensor	1	1	0.000114142
G8	Oliekøler	1	1	0.000114142
G9	Olievarmer	1	1	0.000114142
G10	Overtryksventil	1	1	0.000114142
G11	Slanger	1	1	0.000114142
G12	Slæbering	1	1	0.000114142
G13	Pumpe	1	1	0.000114142
Unavailability				0.001483849
Availability				0.998516151

Code	Driveline	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
D1	Bolte	1	1	0.000114142
D2	Kardanaksler	1	1	0.000114142
D3	Kobling	1	1	0.000114142
Unavailability				0.000342427
Availability				0.999657573

Code	Generator	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
E1	Bolte	1	1	0.000114142
E2	RPM sensor	1	1	0.000114142
E3	Støddæmper	1	1	0.000114142
E4	Kobling	1	1	0.000114142
E5	Lejer	1	1	0.000114142
E6	Temperatursensor	1	1	0.000114142
E7	Terminaler	1	1	0.000114142
E8	Kabler	1	1	0.000114142
E9	Slanger	1	1	0.000114142
E10	Pumpe	1	1	0.000114142
E11	Vanddækning	1	1	0.000114142
Unavailability				0.001255564
Availability				0.998744436

Code	Inddækning	MTBF år	Nede-tid timer	
I1	Luft cirkulation	1	1	0.000114
I2	Vindfane	1	1	0.000114
I3	Anemometer	1	1	0.000114
I4	Temperatursensor	1	1	0.000114
Unavailability				0.000457
Availability				0.999543

Code	Nav	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
A1	Bolte	1	1	0.000114142
Unavailability				0.00011414
Availability				0.99988586

Code	Rotor Hydraulik	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability
R1	Bolte	1	1	0.000114142
R2	Filter	1	1	0.000114142
R3	Hydraulikstation	1	1	0.000114142
R4	Hydraulikslanger	1	1	0.000114142
R5	Ikke returnventil	1	1	0.000114142
R6	Magnetventil	1	1	0.000114142
R7	Microswitch	1	1	0.000114142
R8	Olie	1	1	0.000114142
R9	Overløbsventil	1	1	0.000114142
R10	Tryk switch	1	1	0.000114142
R11	Sikkerhedsventil-pop out	1	1	0.000114142
R12	Accumulator	1	1	0.000114142
R13	Sprængblik	1	1	0.000114142
R14	Kabler	1	1	0.000114142
Unavailability				0.00159799
Availability				0.99840201

Code	System	MTBF år	Nede-tid timer	Unavailability Syst.	Unavailability ovf.
T	Tårn	10	24	0.000273898	0.000570711
S	Styring	8	12	0.000171204	0.002396987
P	Printkort	6	12	0.000228258	0.000342427
K	Krøjesystem	8	24	0.000342349	0.000913138
N	Nacelle	8	24	0.000342349	0.000684853
H	Hovedaksel	8	48	0.000684463	0.001255564
G	Gearkasse	7	48	0.000782167	0.001483849
B	Mekanisk bremse	4	12	0.000342349	0.001712133
D	Driveline	6	24	0.000456413	0.000342427
E	Generator	8	48	0.000684463	0.001255564
I	Inddækning	4	12	0.000342349	0.000456569
A	Nav	9	24	0.000304321	0.000114142
R	Rotor hydraulik	5	12	0.000273898	0.001597991
V	Vinger	6	48	0.000912409	0.001255564
Unavail. Af 1 mølle				0.00614089	0.01438192
Availability af 1 mølle				0.99385911	0.98561808
Tilg. En mølle, afrundet				0.9939	0.9856
Antal møller		20			
p(0 møller stoppet)	Alle kører	0.8841			0.7485
p(1 mølle stoppet)	Alle -1 kører	0.1093			0.2184
p(2 møller stoppet)	Alle -2 kører	0.0064			0.0303
p(3 møller stoppet)	Alle -3 kører	0.0002			0.0027
p(4 møller stoppet)	Alle -4 kører	0.0000			0.0002
Middel Unavailability					
af møllepark		0.12281772			0.287638397

D Sandsynlighedsfordeling for mølleudfald

Availability $a(t)$ for en mølle antages eksempelvis at være 98%. Det betyder, at møllen i 98% af kalendertiden vil være i stand til fuld energiproduktion. Omvendt betyder det også, at møllen vil være stoppet i 2% af kalendertiden. Unavailability $q(t)$ er da $q(t) = 1 - a(t) = 2\%$.

Availability betyder direkte sandsynligheden for, at møllen er "oppe" til tiden t . Det betyder så også, at q er sandsynligheden for at møllen er "nede" til tiden t .

Vi antager, at vi har 20 møller.

Sandsynligheden for at netop 20, 19, 18 etc. møller er oppe til tiden t følger da en binomialfordeling, hvor værdierne beregnes efter Binomialformlen

$$S_r = \binom{n}{r} p^r q^{n-r}$$

Binomialformlen angiver sandsynligheden for at udtage netop r af n mulige, når sandsynligheden for den enkelte udtagning er p og sandsynligheden for ikke udtagning er $q = 1 - p$.

$$\text{Udtrykket } \binom{n}{r} \text{ har værdien } \binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$$

Vort p er her 2% eller 0.02 og q er da 98% eller 0.98.

Vi beregner da, idet S_0 i vort eksempel betyder, at ingen møller er fejlede etc.

$$S_0 = \frac{20!}{0! \cdot 20!} \cdot 0.02^0 \cdot 0.98^{20} = 1 \cdot 1 \cdot 0.67 = 0.67 \text{ (alle 20 møller er oppe)}$$

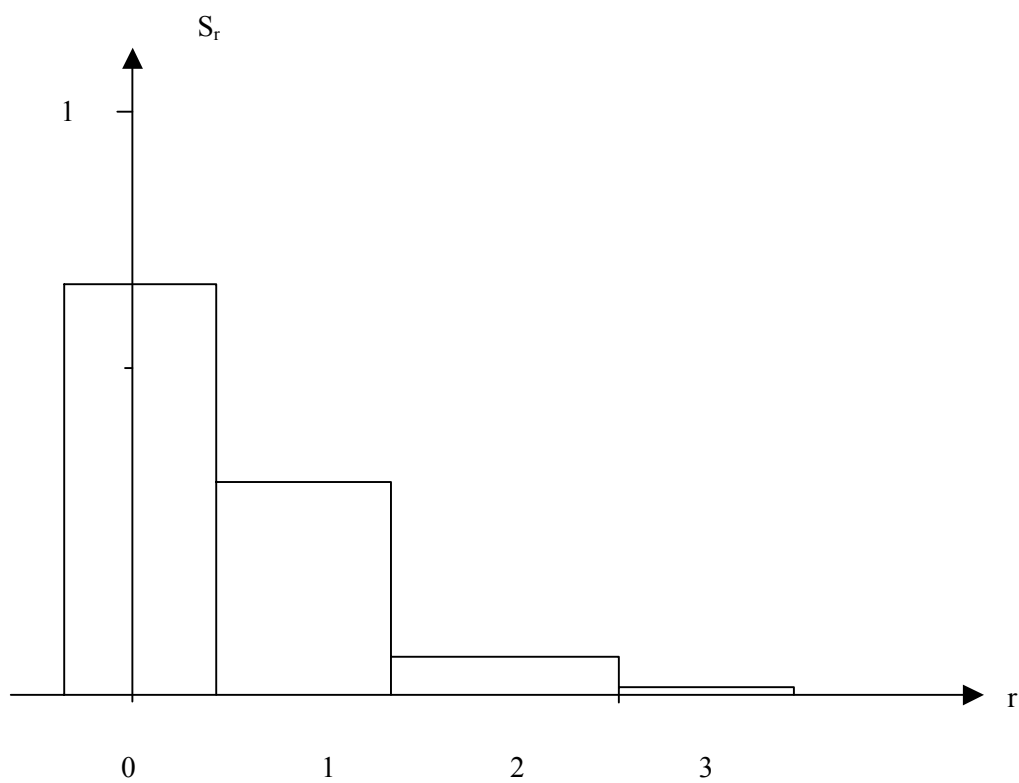
$$S_1 = \frac{20!}{1! \cdot 19!} \cdot 0.02^1 \cdot 0.98^{19} = 20 \cdot 0.02 \cdot 0.68 = 0.27 \text{ (netop 19 møller er oppe)}$$

$$S_2 = \frac{20!}{2! \cdot 18!} \cdot 0.02^2 \cdot 0.98^{18} = 190 \cdot 0.0004 \cdot 0.70 = 0.05 \text{ (netop 18 møller er oppe)}$$

$$S_3 = \frac{20!}{3! \cdot 17!} * 0.02^3 * 0.98^{17} = 1140 * 0.000008 * 0.71 = 0.01 \text{ (netop 17 møller er oppe)}$$

etc.

Vi kan da tegne fordelingen op:



E Bayesisk netværk som beslutningsværktøj og klimamodel

Som nævnt gennemgik udvælgelsen af modelværktøj for opgaven flere stadier, hvoraf skal nævnes fejltræer, Bayesiske netværk og influensdiagrammer og endelig Markovmodellering.

Bayesiske netværk er meget anvendelige til modellering af det samlede udfald af en række hændelser, der er betinget på hinanden. Det syntes som om det såkaldte klimavindue, dvs. det sammenhængende tidsrum, hvor vejret er godt nok til sejlads og reparationsarbejde, måtte kunne behandles som en statistisk størrelse betinget på en række klimafaktorer.

Dette vist sig også indledningsvis muligt, men en anden faktor viste sig at trække i negativ retning for anvendelsen af en Bayesisk netværksmodel. Hovedmodellen, dvs. den model, som beskriver tidsforløbet for en reparation som en sum af en række tidsrum, viste sig at nødvendiggøre en mulighed for beskrivelse af tidsforløb. Hertil var den Bayesiske model for klimavinduet ikke tilstrækkelig, idet den kun kunne give en statistisk fordeling for klimavinduet set i gennemsnit over en længere tidsperiode.

Arbejdet med den Bayesiske model for klimavinduet har dog haft så stor betydning for det videre modelleringsarbejde at den vil blive kort beskrevet her.

Et Bayesisk net er et net af forbundne knudepunkter. Knudepunkterne repræsenterer hændelser. Forbindelseslinierne mellem knudepunkterne repræsenterer kausale betingelser mellem de hændelser, der er forbundne. Forbindelseslinierne er retningsorienterede, dvs. de beskriver en kausalitet fra en hændelse til en anden. Mere præcist formuleret er et Bayesisk netværk en acyklisk graf, hvor knudepunkterne repræsenterer stokastiske variable, som hver beskrives med en tabel indeholdende et sæt sandsynligheder. Knudepunkterne kan være "forældre" eller "børn", hvor hver af forældrene har en tabel med ubetingede variable og hver af børnene en tabel med betingede variable. Disse sæt af variable refererer til et endeligt sæt af tilstande, som hver variabel kan antage. Netværket kaldes Bayesisk fordi Bayes' sætning ligger bag de følgeslutninger, der kan drages ved hjælp af netværket ved propagering af tabelværdierne gennem nettet. Ifølge den Bayesiske tankegang udstyres hvert knudepunkt med a priori sandsynligheder. På denne baggrund kan en hændelses sandsynlighed beregnes. Kommer der ny information til, som kan opdatere en af a priori-hændelserne beregnes den oprindeligt fundne sandsynlighed ved hjælp af Bayes' regel, hvorved en a posteriori sandsynlighed fremkommer.

Nogle indledende studier af vedligeholdelsesproblematikken er blevet beskrevet i et paper i en workshop i "European Society for Reliability Data". Dette paper er gengivet på de følgende sider.

De indledende forsøg på at beskrive situationen på Rødsand resulterede i et detaljeret influensdiagram, som er gengivet på næste side.

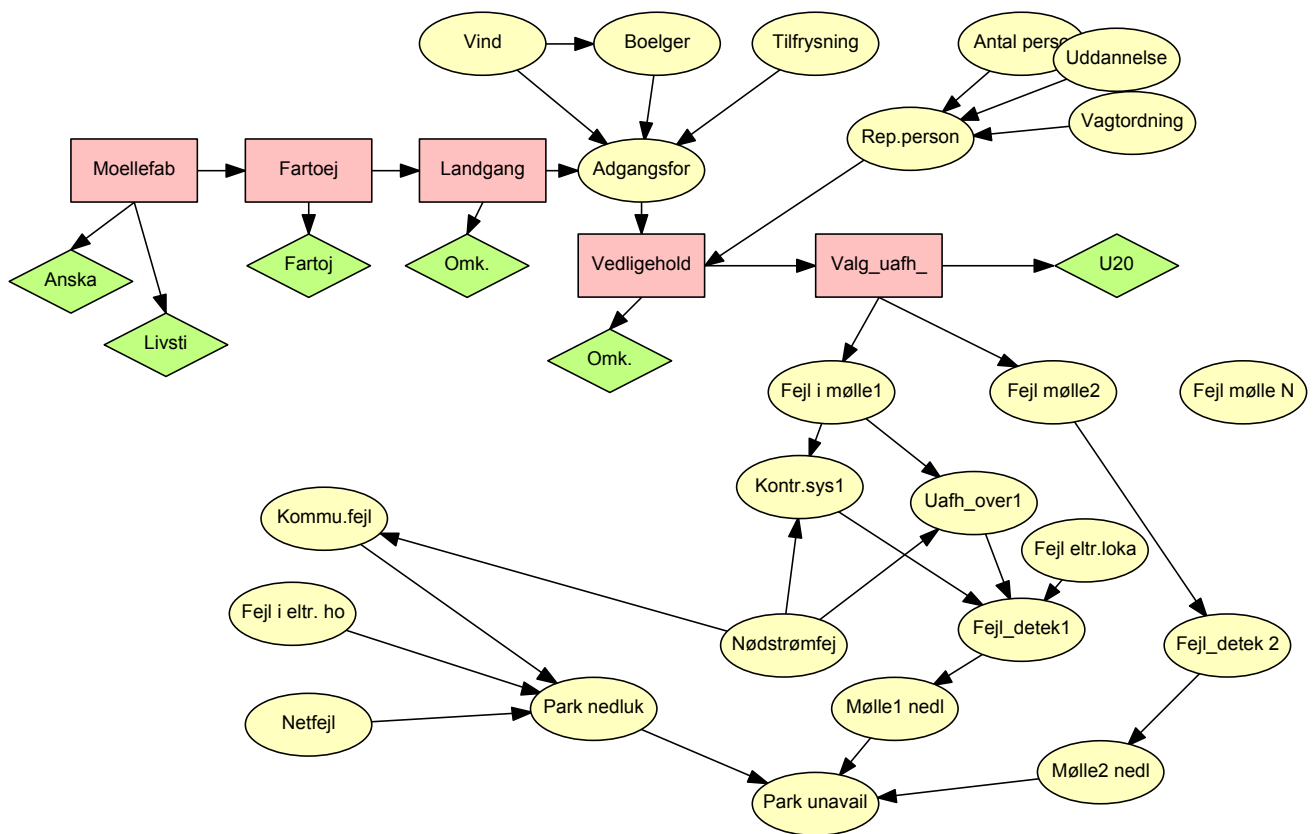


Figure 1. Influensdiagram for vedligeholdssituationen på Rødsand

Maintenance Planning for Off-shore Wind Turbines

by Means of Bayesian Networks.

**Palle Christensen,
Risø National Laboratory, Denmark and**

**Morten L. Thøgersen, Energi- og Miljødata, Aalborg,
Denmark**

Abstract. The use of Bayesian Networks and Influence Diagrams for decision making for maintenance strategy for off shore wind turbines is demonstrated with a simple example.

1. Introduction

In the chapter named “Introduction to Axiomatic Decision Tools” Christensen gives an introduction to the basics of Bayesian Networks and Influence Diagrams.

A Bayesian Network consists of a net of interconnected chance nodes. Interconnections are directional, the direction depicting a direction of causality, i.e. cause-effect relations. Loops are not allowed in this type of network. An effect has an attribute called its strength. This strength is modelled as a probability. A formality of parents and children is used in the description of the node hierarchy. Formally a Bayesian Network can be defined as a directed acyclic graph with certain properties: A node represents a random variable with possible, mutually excluding states. If a node representing a variable A has parent nodes representing variables B_1, B_2, \dots, B_n it is assigned a conditional probability table $P(A|B_1, B_2, \dots, B_n)$. This means that each variable without parents has an unconditional distribution, while each variable having parents is having a conditional probability table.

Bayesian Networks enhanced with decision nodes and utility nodes are called Influence diagrams. The decision nodes model decisions taken by the decision-maker and the utilities model the outcome of the combination of causal dependencies and the decisions.

In order to illustrate the functionality of these networks and the working procedures applied a simple example is given. This example is using the HUGIN tool.

The decision-maker has to decide on a maintenance strategy for the turbine. He can choose between different preventive maintenance schemes and corrective maintenance. The result will be different availabilities at different costs. Finally he wants to make a prediction of the annual energy production as a function of the availabilities obtained.

2. A simple Bayesian Network for availability versus turbine faults

This simplified example anticipates that the turbine itself can fail and that the mains supply can fail fig. 1. These two variables are parent variables. A control system and an independent surveillance system monitor the turbine.

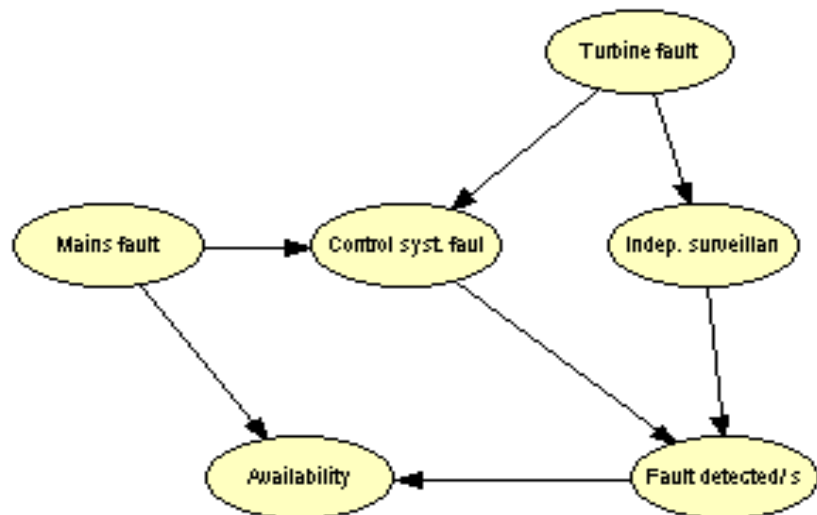


Figure 2. Bayesian Network. Turbine fault detection.

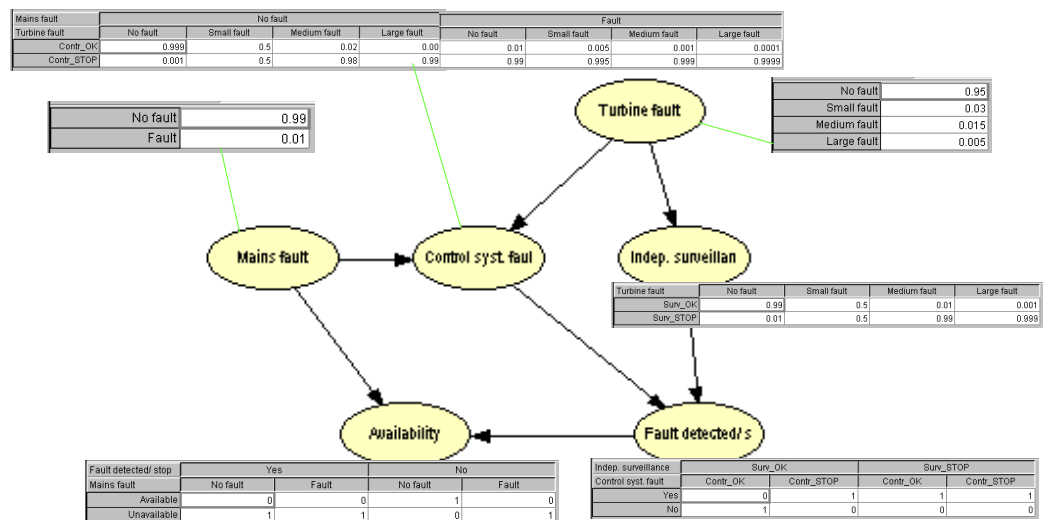


Figure 3. Turbine fault detection. Probability tables.

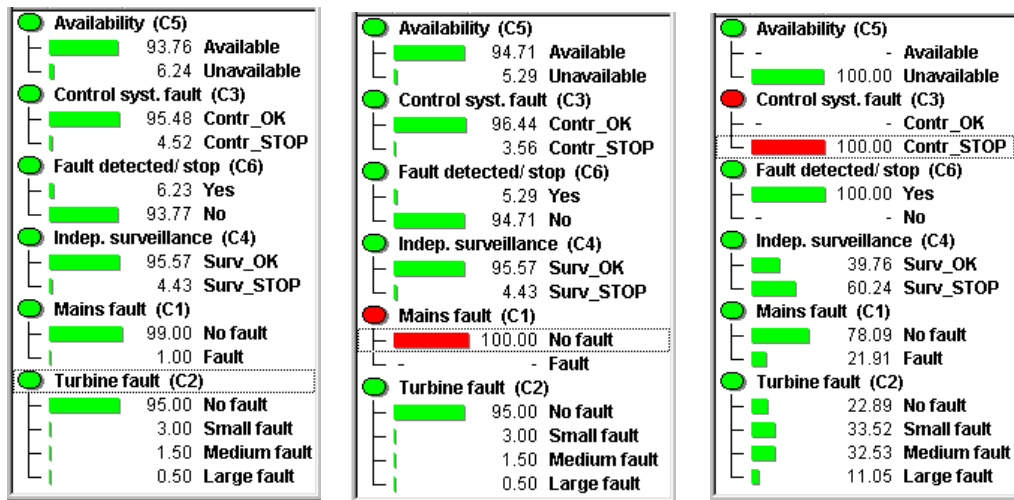


Figure 4. Turbine fault detection. Propagation of evidence.

Each has a high chance of detecting a turbine fault and a low risk of generating a false alarm. True or false alarms will stop the turbine and contribute to the unavailability. In fig 2 the nodes are shown with their attached probability tables, which are unconditional for the two parents and conditional for the children. The a priori probability for each node is filled in according to the best knowledge of their values. The HUGIN program can propagate these values through the network. Fig. 3 shows three examples of propagated values. The first table gives an availability of 93.71 % if all the a priori values are anticipated to be correct. In the next table a new propagation assumes that the mains fault probability is known to be 0. The propagation of this value gives an availability of 94.71%. The third table assumes that the control system is issuing a permanent STOP, which gives 100% of unavailability.

3. Influence Diagram for maintenance options

In fig. 4 a few extra boxes have been added. The square box is a Decision Node, and the diamond-shaped boxes are Utility Nodes. Decision nodes have attached tables of options for the decision, while Utility Nodes have tables of profit or cost. Costs are normally assigned negative values, and profits positive values. In the example decisions can be made between 5 repair rates. The Repair Rate node has a utility node called Maintenance Price with a table of costs for each type of maintenance. The Turbine Fault node now has a utility node for the repair price of the four classes of faults earlier specified. The Turbine Fault node has become much more complicated than before, now comprising fault probabilities related to the types of maintenance.

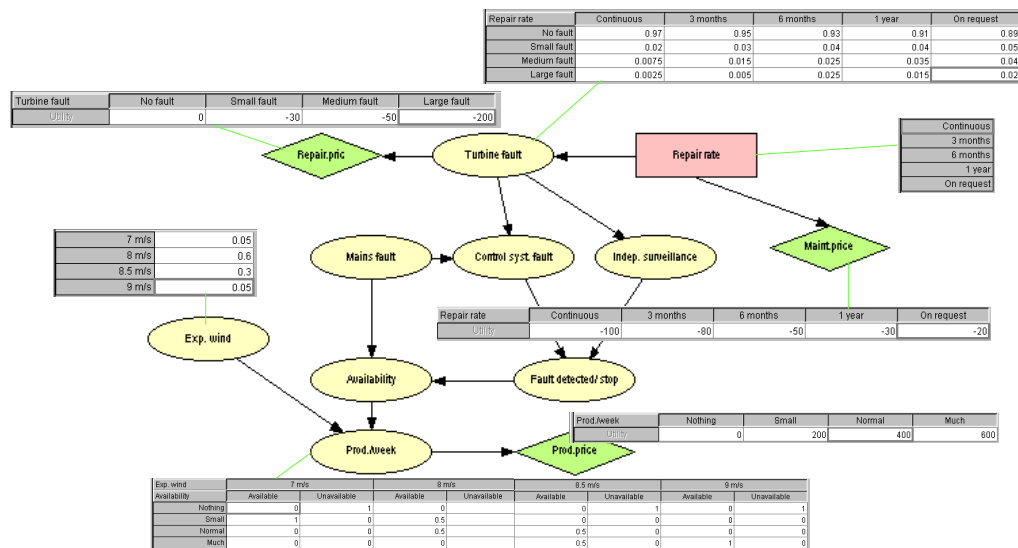


Figure 5. Influence diagram. Production model.

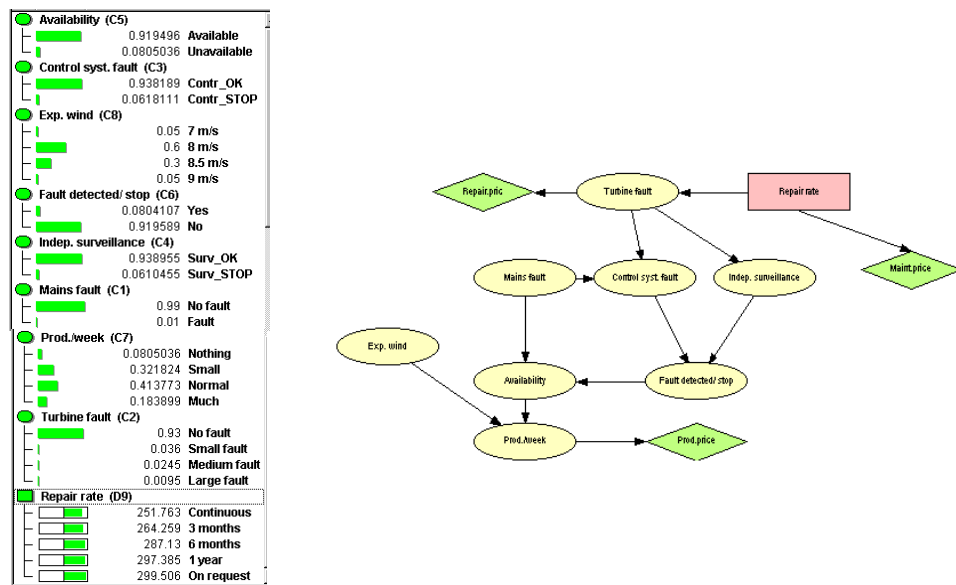


Figure 6. Influence diagram. Propagated probabilities.

The power production can be predicted based on the availability of the turbine and the wind speed chance node introduced. The Production table has a conditional probability table and an attached utility node called Production Price.

Like in the simple example the HUGIN software can now propagate values of probabilities, decisions, and utilities through the network. In fig. 5 the result of the propagation under the assumption of all assumed values being correct is shown. Among other values the table gives the availability, the price of differ-

ent maintenance types, and the production figures. In the same way as in the simple example new evidence may be propagated through the network, and the resulting utilities may be determined as a basis for the decision about maintenance strategy.

4. Conclusion

The use of Bayesian Networks and Influence Diagrams has been demonstrated for a simple example. As long as the cause-effects can be expressed as probabilities the method is very applicable. In the example many a priori probabilities have been taken arbitrarily. It has to be realised that practical values may be difficult to obtain. When the process is being modelled in greater detail the provision of probabilities become more and more difficult. Furthermore the method assumes that the process to be described has no time dependencies.

References

Christensen, P. Introduction to Axiomatic Decision Tools, *ibid*.
HUGIN On-line Manual. <http://www.hugin.dk/>

F Fejldata for 163 møller fra SEAS og deraf afledede statistiske modeller

Til etablering af et skøn over middeltid mellem fejl og fejlenes varighed foreligger fra SEAS statistikker for 163 møller for de første 270 dage af 2001. Der foreligger 3 opgørelser, ”Jobomkost per job type”, ”Gennemsnitlig tid mellem fejl (MTBF)” og ”Gennemsnitlig tid mellem fejl per objekt”.

Ved vurdering af tabellerne har det været muligt at udarbejde skøn på de to omtalte fordelingers middelværdier. Kun de to førstnævnte tabeller fra originalmateriale har været anvendt direkte hertil. Da den førstnævnte af tabellerne rummer tider både for planlagt vedligehold og uplanlagt, korrektivt vedligehold, har det været muligt at fastlægge et skøn for det korrektive vedligehold alene som ønsket.

Middeltid mellem fejl

26-SEP-2001		Gennemsnitlig tid mellem fejl (MTBF)		Side 1
Funktionsfejl		Antal fejl	Gems. tid (dage)	
AL	Alarm	381	1	
EL	Elektrisk	286	1	
HYDF	Hdraulisk fejl	218	1	
A	Andet	110	2	
TEMP	Termisk	61	4	
LÆK	Lækage	45	6	
ELKO	Elektrisk kortslutning/overslag	39	7	
KOMF	Kommunikationsfejl	38	7	
SRF	Styrings- og/el. reguleringsfejl	34	8	
NBRU	Nedbrud	27	10	
HAV	Havari	25	10	
BR	Bremsefejl	24	11	
BRUD	Brud	22	12	
MEK	Mekanisk	22	12	
KOMM	Kommunikation modemfejl	14	18	
EFF	Overeffekt	12	21	
TRYK	Tryk	11	22	
STOP	Stoppet	9	27	
PARF	Parameterfejl	7	34	
SVIG	Svigt	7	34	
MST	Manglende styrestrøm	6	38	
VIB	Vibration	6	38	
NØD	Nødstop	5	45	
NET	Netfejl	4	54	
UTÆT	Utæt	3	67	
REVD	Revnedannelse	2	90	
STØJ	Støj	2	90	

163.111

2

b

Statistikkerne gælder for alle SEAS' møller, så det er et meget bredt billede, de giver, men i mangel af bedre har vi antaget, at disse kan repræsentere havmøllerne også. De to anvendte tabeller er gengivet nedenfor.

Der har ialt været 1420 fejl på de 163 møller i 270 dage. For en enkelt mølle giver det en middeltid mellem fejl (MTBF) på $(163 \times 270) : 1420 \text{ dage} = 30.99 \text{ dage}$. Der foreligger ikke materiale til bestemmelse af fordelingsfunktionen for denne fejlrage, så i mangel af bedre er gjort den antagelse, som meget ofte er gyldig, at fejlene er eksponentielt fordelt med $\lambda = 1 : 30.99 \text{ dage}^{-1} = 0.0323 \text{ dage}^{-1}$.

Reparationstider

26-SEP-2001 Side 2

Jobomkost. per Job type

Job type	Jobs	Timearbejde	Omkostni			Total
			Lønomic	Materiale	Tool Cost	
APV Allyn Planlæg	45	365.00	110444.20	6015.17	.00	116459.36
APVF	53	1900.50	367067.64	357450.25	.00	724517.89
AUV	799	6505.00	1003601.30	110901.69	.00	1114502.99
AUVF	51	1572.00	248170.23	256589.65	.00	504759.87
FPV Forebyggende	189	2971.00	462885.30	109179.29	.00	572064.59
FPVF	43	1018.50	155027.53	327020.25	.00	482047.78
IS	8	7.00	1356.95	4370.07	.00	5727.02
PROJ Projektur	17	515.03	128472.43	75506.62	.00	203979.04
ST Stående p.b. opg.	20	1493.48	601278.83	2415.00	.00	603693.83
VREP Værelsted	23	342.00	77480.66	20187.50	.00	97668.16
VSA Andre	44	372.00	74285.66	829.05	.00	75114.71
Total	1292	17061.51	3230070.69	1270484.53	.00	4500535.22

Person 2/3 Ford: 1 time er for bilen ud af hver 2 timer

I ovenstående skema, Jobomkostninger per job type, er anført reparationstider for 1202 reparationer udført på SEAS' møller. Kun de 2 job-typer AUV og AUVF beskriver korrekt vedligehold. For AUV er der 799 jobs, der tilsammen har været 6505 timer og 51 jobs, som har været 1572 timer. Disse data kan ikke bruges til at skønne fordelingsfunktionen for reparationstider, men kun en middelværdi, som bliver $(6505 + 1572) / (799 + 51) = 9.5 \text{ timer}$. Det er oplyst, at den gennemsnitlige transporttid er 1/3 af den samlede tid. Derfor er den gennemsnitlige, rene reparationstid kun 2/3 af 9,5 timer, dvs. 6,3 timer. Det er bekendt, at reparationstiderne for møllerne ikke er de samme for alle fejl, så et skøn på konstant reparationstid vil være i strid med erfaringerne. Det er ofte et godt skøn at antage, at reparationstiderne er eksponentielt fordelt. Antages dette er funktionen helt fastlagt ved en parameter, nemlig middelværdien. I det matematiske udtryk for denne eksponentialfunktion anvendes MTTR, middeltiden til reparation, som parameter. MTTR er da 6,3 timer svarende til en reparationsrate på 0.16 h^{-1} .

G Model for vejrvindue fra Dansk Hydraulisk Institut (DHI)

DHI har udarbejdet en oversigt over vejrvinduer. Denne oversigt og dens forudsætninger er gengivet nedenfor. Til sammenligning med nærværende projekt fremgår det, at DHI i deres undersøgelse kun har taget vinden i betragtning. Det har betydelig interesse at eftervise, om modellen fra nærværende projekt kan reproducere vejrvinduerne fra DHI.

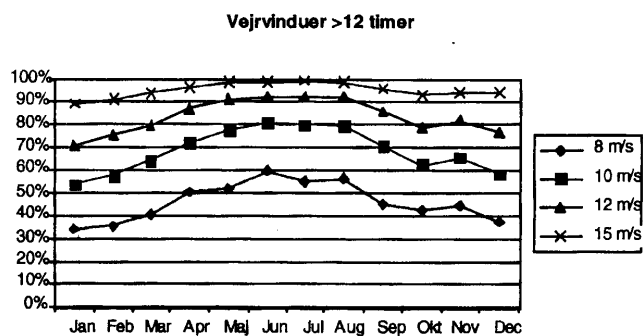
DHI's model for vejrvinduer på Rødsand (ordret kopieret):

De operationelle vindforhold er evalueret ud fra en vind tidsserie, so dækker en periode på 17 år, fra og med 1983 til og med 1999. Tidsserien er udarbejdet af Risø /17/ og indeholder vindhastighed og vindretning ved Rødsand. Værdierne er 10 minutters gennemsnitsværdier for hver time. Hastigheden svarer til hastigheden i 10.2 m over havoverfladen, retningen svarende til retningen i 30 m over havoverfladen. Datadækningen er 97%. De 3% af tidsserien, hvor der ikke foreligger data, er til viderebehandlingen blevet udfyldt med værdierne fra de tilsvarende perioder i 1986.

På basis af denne tidsserie er der udarbejdet vejr- og downtimevinduer for opstillingsområdet. Et vejrvindue er defineret som et sammenhængende tidsrum indenfor hvilket vindhastigheden er mindre end en vis tærskelværdi. Et downtime vindue er på lignende vis defineret som et sammenhængende tidsrum indenfor hvilket vindhastigheden er større end en vis tærskelværdi. Vejr- og downtimeanalysen angiver på månedsbasis sandsynligheden for at et bestemt vejr- og downtimevindue forekommer. Analysen er nærmere beskrevet i bilag C, hvor der også findes en anvisning på anvendelse af vejr- og downtimeanalysen.

Følgende perioder er benyttet i vejr/downtime analysen: 0, 6, 12, 18, 24, 36, 48, 60 og 72 timer. Som tærskelværdier er benyttet 8, 10, 12 og 15 m/s.

Resultaterne af vejr- og downtimeanalysen af vinden er præsenteret i bilag C. I figur 3.5 og tabel 3.4 er vist et eksempel på en vejrvinduesanalyse for et vindue på 12 timer. Af tabellen og figuren ses for eksempel, at der i april måned er 72% sandsynlighed for at have et vejrvindue på 12 timer med vindhastighed på mindre end 10 m/s.



Figur 3.5 Eksempel på plot med vejrvinduer med en varighed på mere end 12 timer for givne vindhastigheder.

Tabel 3.4 Eksempel på tabel med vejrvinduer med en varighed på mere end 12 timer for givne vindhastigheder.

Varighed > 12 timer	Vejrvinduer			
	Procentuel forekomst i normalår			
Vindhast	8 m/s	10 m/s	12 m/s	15 m/s
Jan	34%	53%	71%	89%
Feb	35%	57%	75%	91%
Mar	40%	64%	80%	94%
Apr	50%	72%	88%	97%
Maj	52%	77%	91%	99%
Jun	59%	81%	93%	99%
Jul	55%	80%	93%	99%
Aug	57%	79%	93%	99%
Sep	45%	71%	86%	96%
Okt	42%	62%	79%	93%
Nov	44%	66%	82%	95%
Dec	37%	59%	77%	95%



Mission

At fremme en værdiskabende og miljømæssigt forsvarlig teknologisk udvikling inden for energi, industriel teknologi og bioproduktion gennem forskning, innovation og rådgivning.

Vision

Risøs forskning **flytter grænser** for forståelsen af naturens processer og sammenhænge helt ned til den molekylære nanoskala.

Resultaterne **sætter trend** for udviklingen af bæredygtige teknologier inden for energi, industri og bioteknologi.

Indsatsen **gavner** det danske samfund og fører frem til nye industrier i milliardklassen.

ISBN 87-550-3066-1

ISBN 87-550-3068-8 (Internet)

ISSN 0106-2840

Forskningscenter Risø

Afdelingen for Informationsservice

Postboks 49

4000 Roskilde

Telefon 4677 4004

risoe@risoe.dk

Fax 4677 4013

Website www.risoe.dk

Title and authors

Reliability Model for Offshore Wind Farms

Palle Christensen, Jette Lundtang Paulsen, Morten Lybech Tøgersen og Thomas Krogh, Risø National Laboratory

Niels Raben, Martin Heyman Donovan og Lars Jørgensen SEAS.

Martin Winther-Jensen.

ISBN	ISSN
87-550-3066-1	
87-550-3068-8 (Internet)	0106-2840
Department or group	Date
System Analysis Department	May 2002
Groups own reg. number(s)	Project/contract No(s)

Sponsorship

Danish Energy Agency

Pages	Tables	Illustrations	References
61	11	7	13

Abstract (max. 2000 characters)

A method for the prediction of the mean availability for an offshore windfarm has been developed. Factors comprised are the reliability of the single turbine, the strategy for preventive maintenance the climate, the number of repair teams, and the type of boats available for transport. The mean availability is defined as the sum of the fractions of time, where each turbine is available for production. The project has been carried out together with SEAS Wind Technique, and their site Rødsand has been chosen as the example of the work. A climate model has been created based on actual site measurements. The prediction of the availability is done with a Monte Carlo-simulation. Software was developed for the preparation of the climate model from weather measurements as well as for the Monte carlo-simulation. Three examples have been simulated, one with guessed parameters, and the other two with parameters more close to the Rødsand case.

Descriptors INIS/EDB

AVAILABILITY; CLIMATE MODELS; COMPUTERIZED SIMULATION;
FORECASTING; MAINTENANCE; MONTE CARLO METHOD;
OFFSHORE SITES; RELIABILITY; WIND TURBINE ARRAYS